

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Bruno Lansini**

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CURA NA  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO**

Porto Alegre  
julho 2016

**BRUNO LANSINI**

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CURA NA  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO**

Trabalho de Diplomação a ser apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientadora: Angela Borges Masuero**  
**Orientadora Conjunta: Denise Carpena Coitinho Dal Molin**

Porto Alegre  
julho 2016

**BRUNO LANSINI**

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE CURA NA  
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, julho de 2016

Profa. Angela Borges Masuero  
Dra. pela UFRGS  
Orientadora

Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
Dra. pela UFRGS  
Orientadora Conjunta

Profa. Cristiane Sardin Padilla  
Dra. pela UFRGS  
Relatora

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Angela Borges Masuero (UFRGS)**  
Dra. pela UFRGS

**Profa. Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
(UFRGS)**  
Dra. pela UFRGS

**Profa. Cristiane Sardin Padilla De  
Oliveira (UFRGS)**  
Dra. pela UFRGS

**Prof. Rafael Mascolo (Univates)**  
MSc. pela UFRGS

## **AGRADECIMENTOS**

À professora Angela e professora Denise, agradeço pela orientação e por todos os ensinamentos, tornando possível a realização desse trabalho.

Ao Anderson, Mauro e Carina, grandes amizades que ganhei nos anos que trabalhei no laboratório, agradeço pela paciência, pelos muitos ensinamentos quando trabalhamos juntos, pelas brincadeiras e principalmente pela grande amizade que espero cultivar pro resto da vida.

Um agradecimento mais que especial a minha quase irmã Caroline, pela grande parceria e ajuda desde a primeira série do ensino fundamental até o último semestre da faculdade.

Aos colegas de faculdade, Edison, Pascoal, Diego Michelin, Joãozinho, Guilherme, pelo futebol e cervejadas nas horas vagas, quando não estávamos cheio de provas e trabalhos, e aos colegas e amigos do Norie.

Aos bolsistas, Guilherme Fuhr, Formiga e Vanessa agradeço pela grande parceria e ajuda na realização dos ensaios em laboratório.

Aos laboratoristas, Aírton, Gilmar e Demétrius agradeço pela disponibilidade para ajudar nos ensaios e pelo grande companheirismo.

Agradeço a minha família, meu pai, minha mãe e meu irmão, por tudo que me ensinaram até hoje e pelo amor e carinho que, sem dúvidas, foi minha base mais forte pra conquistar todos os objetivos que tracei até então.

Agradeço a empresa que forneceu o material e os dados necessários para a realização de todos os ensaios.

Por fim, agradeço a todos, mesmo que não citados, que se fizeram presentes de alguma forma ao longo desses anos e me ajudaram nessa conquista.

“O único lugar aonde o sucesso vem  
antes do trabalho é no dicionário.”

*Albert Einstein*

## RESUMO

Sendo um dos materiais mais empregados na construção civil, o concreto é uma grande fonte de estudos tanto em seu estado fresco quanto no estado endurecido. Uma de suas principais variáveis de estudo é a resistência à compressão. Neste trabalho, foi investigada a variação da resistência à compressão do concreto variando sua temperatura de cura. O traço de concreto ( $f_{ck}=40\text{MPa}$ ) e os materiais constituintes foram fornecidos por uma construtora a qual está executando uma obra de grande porte na região metropolitana de Porto Alegre, e as temperaturas de cura foram definidas em  $5^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$  e  $60^{\circ}\text{C}$ . Para a temperatura de  $5^{\circ}\text{C}$  foi acrescentada uma variável extra: os corpos de prova foram envoltos por uma manta que, de acordo com o fabricante, ajuda a manter o calor do concreto para a ocorrência das reações de hidratação do cimento. Os corpos de provas foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão com idade de 16h, 24h, 7 dias e 28 dias. Como ensaio complementar, fez-se a medição da temperatura interna dos corpos de prova nas primeiras 24h com o auxílio de um Field Logger e termopares do tipo K. As resistências à compressão na temperatura de  $5^{\circ}\text{C}$ , com e sem a manta térmica, ficaram muito próximas em todas as idades de ruptura, comparadas entre si, chegando aos 28 dias a apenas 50% da resistência esperada, aproximadamente. Para temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  houve um crescimento gradual ao longo do tempo alcançando, aos 28 dias, resistência acima do esperado. A temperatura mais elevada,  $60^{\circ}\text{C}$ , teve um crescimento acelerado nas primeiras idades, porém, aos 28 dias, uma resistência à compressão menor que a alcançada com temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ . As temperaturas internas dos corpos de prova se estabilizaram próximas a suas temperaturas de cura, observando-se uma queda de temperatura mais lenta no corpo de prova com a manta térmica em relação ao sem a manta, na temperatura de  $5^{\circ}\text{C}$ .

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas do trabalho .....	17
Figura 2 – Perda de abatimento em função do tempo transcorrido desde o início da mistura .....	30
Figura 3 – Influência das temperaturas e moldagem de cura sobre a resistência do concreto .....	37
Figura 4 – Influência das temperaturas e moldagem de cura sobre a resistência do concreto .....	37
Figura 5 – Influência da temperatura de cura sobre a resistência à compressão a 1 dia e a 28 dias (corpos de prova ensaiados depois de resfriados a 23°C durante duas horas ) .....	38
Figura 6 – Efeito da temperatura durante as duas primeiras horas após a moldagem sobre o desenvolvimento da resistência (todos os corpos de prova selados e, após, duas horas curados a 21 °C) .....	39
Figura 7 – Relação entre a resistência à compressão e a duração da cura de compactos de pasta de cimento pura em diferentes temperaturas de cura. A temperatura dos corpos de prova foi mantida constante até e durante o período do ensaio ..	40
Figura 8 – Resistência do concreto curado a vapor a diferentes temperaturas (relação água/cimento = 0,55; cura aplicada imediatamente após a moldagem) .....	41
Figura 9 – Influência da temperatura do ar e do concreto sobre a perda de água do concreto nas primeiras idades (umidade relativa 70%; velocidade do vento 4,5 m/s) .....	42
Figura 10 – Influência da umidade relativa do ar sobre a perda de água do concreto nas primeiras idades (temperatura do ar 21°C; velocidade do vento 4,5 m/s) .....	42
Figura 11 – Influência da temperatura sobre a perda de abatimento de concretos com diversos tamanhos de agregados .....	43
Figura 12 – Ciclo de temperatura .....	44
Figura 13 – Matriz experimental .....	49
Figura 14 – Curva granulométrica do agregado miúdo .....	52
Figura 15 – Curva granulométrica dos agregados graúdos .....	53
Figura 16 – Sacos confeccionados com a manta térmica .....	54
Figura 17 – Corpo de prova envolvido pela manta térmica .....	54
Figura 18 – Ensaio de abatimento do concreto .....	56
Figura 19 – Aspecto visual do corpo de prova preparado para receber o processo de cura.....	57
Figura 20 – Corpos de prova armazenados em banhos térmicos com temperatura de 25°C após a desmoldagem e retirada dos sacos plásticos .....	57
Figura 21 – Corpos de prova envoltos e fechados em sacos plásticos posicionados em banho térmico com temperatura controlada = 60°C .....	57

Figura 22 – Corpos de prova envoltos e fechados em sacos plásticos posicionados em caixas plásticas no interior da geladeira com temperatura controlada = 5°C ....	58
Figura 23 – Aparelho para medição e registro das temperaturas (Field Logger) .....	59
Figura 24 – Termopar tipo K .....	59
Figura 25 – Interface do Software Field Logger .....	59
Figura 26 – Corpo de prova com termopar posicionado .....	60
Figura 27 – Corpo de prova com manta e termopar posicionado .....	60
Figura 28 – Ensaio da medição da temperatura interna .....	61
Figura 29 – Influência da temperatura de cura na resistência à compressão do concreto ao longo do tempo .....	64
Figura 30 – Resistência à compressão ao longo da idade .....	65
Figura 31 – Percentagem da resistência à compressão ao longo do tempo considerando 100% a resistência de 25°C aos 28 dias .....	66
Figura 32 – Percentagem da resistência à compressão ao longo do tempo considerando 100% a resistência de cada temperatura aos 28 dias .....	67
Figura 33 – Temperatura interna do concreto nas primeiras 24 horas .....	68
Figura 34 – Temperatura interna do concreto nas primeiras 3 horas .....	69
Figura 35 – Análise estatística da influência da temperatura de cura do concreto sobre a resistência à compressão ao longo do tempo .....	70



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos agentes agressivos .....	34
Tabela 2 – Proporcionamento dos materiais, traço unitário em massa .....	50
Tabela 3 – Distribuição granulométrica, módulo de finura e diâmetro máximo do agregado miúdo .....	51
Tabela 4 – Características físicas dos agregados graúdos .....	52
Tabela 5 – Características dos aditivos descritas pelo fabricante .....	53
Tabela 6 – Dados das concretagens .....	55
Tabela 7 – Fator de correção da carga de ruptura .....	62
Tabela 8 – Resistência média à compressão e desvio padrão, ao longo do tempo .....	63
Tabela 9 – ANOVA: Influência da temperatura e tempo de cura na resistência à compressão .....	70

## **LISTA DE SIGLAS**

ANOVA – Análise de Variância

DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto

Lamtac – Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

Norie – Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	14
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA .....	14
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	14
<b>2.2.1 Objetivo Principal</b> .....	14
<b>2.2.2 Objetivo Secundário</b> .....	14
2.3 HIPÓTESE .....	15
2.4 PREMISSE .....	15
2.5 DELIMITAÇÕES .....	15
2.6 LIMITAÇÕES .....	15
2.7 DELINEAMENTO .....	16
<b>3 CONCRETO</b> .....	18
3.1 CONCRETO: ASPECTOS GERAIS .....	18
3.2 MATERIAIS CONSTITUINTES .....	19
<b>3.2.1 Aglomerante</b> .....	20
3.2.1.1 Hidratação do cimento .....	21
3.2.1.2 Pega e endurecimento .....	22
<b>3.2.2 Agregados</b> .....	23
3.2.2.1 Características do agregado .....	23
3.2.2.1.1 Aderência do agregado .....	23
3.2.2.1.2 Resistência do agregado .....	24
3.2.2.1.3 Massa específica .....	24
3.2.2.1.4 Massa unitária .....	24
3.2.2.1.5 Porosidade e absorção .....	24
3.2.2.2 Classificação.....	25
3.2.2.3 Qualidade dos agregados .....	25
<b>3.2.3 Água de amassamento</b> .....	26
<b>3.2.4 Aditivos</b> .....	26
<b>3.2.5 Adições</b> .....	27
3.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO .....	28
<b>3.3.1 Concreto no estado plástico</b> .....	28
3.3.1.1 Trabalhabilidade .....	28
3.3.1.2 Segregação e exsudação .....	31

<b>3.3.2 Concreto no estado endurecido</b> .....	31
3.3.2.1 Resistência à compressão .....	32
3.3.2.2 Resistência à tração .....	32
3.3.2.3 Deformações .....	32
3.3.2.4 Durabilidade .....	33
<b>3.3.3 Cura do concreto</b> .....	34
<b>3.3.4 Influências da temperatura sobre o concreto</b> .....	36
3.3.4.1 Concretagem em clima quente .....	47
3.3.4.2 Concretagem em clima frio .....	47
<b>4 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	49
4.1 METODOLOGIA .....	49
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	50
<b>4.2.1 Cimento</b> .....	51
<b>4.2.2 Agregados</b> .....	51
4.2.2.1 Agregado miúdo .....	51
4.2.2.1 Agregado graúdo .....	52
<b>4.2.3 Aditivos</b> .....	53
<b>4.2.4 Água</b> .....	54
<b>4.2.5 Manta térmica</b> .....	54
4.3 METODOLOGIA DE ENSAIOS.....	55
<b>4.3.1 Moldagem dos corpos de prova</b> .....	55
<b>4.3.2 Cura</b> .....	56
<b>4.3.3 Temperatura interna do concreto</b> .....	58
<b>4.3.4 Resistência à compressão</b> .....	61
<b>5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	63
5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	63
5.2 TEMPERATURA INTERNA DO CONCRETO .....	68
5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	69
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	71
REFERÊNCIAS .....	72
APÊNDICE A .....	75



## 1 INTRODUÇÃO

A crescente busca por melhores resultados na construção civil aumenta a cada dia, diminuindo-se prazos e buscando-se mais qualidade nos serviços executados. Um dos materiais mais importantes e mais utilizados nesse ramo é o concreto.

Segundo Helene e Andrade (2010, p. 920), o concreto de cimento Portland deve conter cimento, água e agregados, podendo contar com aditivos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições minerais. Para buscar características como trabalhabilidade para o transporte, lançamento e adensamento, além de propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade, a proporção entre os diversos materiais constituintes é buscada pela tecnologia do concreto.

Helene e Terzian (1993, p. 103), afirmam que:

[...] não há dúvida que a propriedade do concreto que melhor o qualifica é a resistência à compressão. Desde que na sua dosagem e preparação tenham sido levados em conta também os aspectos de trabalhabilidade e durabilidade, optando-se por determinada curva granulométrica, tipo e classe de cimento e relação água/cimento e, conseqüentemente, resultando uma certa resistência à compressão. Qualquer modificação na uniformidade, natureza e proporcionamento dos materiais poderá ser indicada por uma variação na resistência. A resistência à compressão é uma propriedade muito sensível, capaz de indicar com presteza as variações da qualidade de um concreto.

O que define, principalmente, a resistência à compressão do concreto é sua relação água/cimento, mas algumas variáveis podem influenciá-la. Uma delas é a temperatura de cura, que apresentando variações, pode influenciar nas reações de hidratação do cimento, as quais conferem resistência ao sistema. Mehta e Monteiro (1994, p. 364) afirmam que a temperatura tem influência sobre diversas propriedades do concreto. Por exemplo, em climas quentes, o concreto está sujeito a fissuras e retração plástica, durante as primeiras idades. Já em climas frios, a taxa de desenvolvimento da resistência pode ser impedida ou retardada pela cura insuficiente do concreto.

Existem diversas maneiras de executar a cura de um determinado concreto, podendo-se variar temperatura e/ou pressão no ambiente em que o material se encontra. O termo **cura do concreto** trata dos procedimentos destinados a promover a hidratação do cimento, consistindo

do controle do tempo, temperatura e condições de umidade, imediatamente após a colocação do concreto nas fôrmas (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 57, grifo dos autores). Diversas empresas usam a cura térmica a fim de acelerar as reações de hidratação do cimento, como exemplo, empresas que fabricam elementos pré-moldados e que buscam o menor tempo possível entre as desformas a fim de aumentar sua produtividade.

Assim, vendo a importância da temperatura de cura, planeja-se, ao final deste trabalho, identificar a relação entre as temperaturas de cura do concreto e a sua resistência à compressão, ao longo do tempo, bem como avaliar o uso de manta térmica como forma de minimizar o efeito das baixas temperaturas de cura.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: qual a variação da resistência à compressão e qual a temperatura interna alcançada, ao longo do tempo, variando a temperatura de cura de um determinado traço de concreto?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundário e são descritos a seguir.

#### **2.2.1 Objetivo principal**

O objetivo principal do trabalho é analisar a influência da temperatura de cura na resistência à compressão, ao longo do tempo, de um determinado traço de concreto.

#### **2.2.2 Objetivo secundário**

São objetivos secundários do trabalho:

- a) avaliação da evolução da temperatura interna do concreto em função da temperatura de cura;
- b) verificação da influência da utilização de uma manta térmica na resistência dos concretos submetidos à baixa temperatura.



## 2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que com o aumento da temperatura de cura do concreto, sua resistência à compressão também irá aumentar. Para a temperatura de 60°C espera-se uma taxa de crescimento, dos 7 aos 28 dias, menor que o crescimento das temperaturas de 5°C e 25°C. Sobre a temperatura interna do concreto, acredita-se que quanto maior a temperatura de cura mais elevada será a temperatura interna.

## 2.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que algumas empresas fabricantes de estruturas pré-moldadas estão tendo problemas na desforma das peças, pois essas estruturas não estão atingindo resistência suficiente em determinadas temperaturas de cura nas primeiras idades.

## 2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a ensaios de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos de concreto e medição da sua temperatura interna nas primeiras idades.

## 2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) não haverá, no momento da concretagem, controle da umidade e temperatura ambiente;
- b) um traço de concreto pré-estabelecido de 40 MPa;
- c) medição da resistência à compressão em quatro intervalos (16 horas, 24 horas, 7 dias e 28 dias);
- d) três temperaturas de cura (5°C, 25°C e 60°C); com o acréscimo de uma variável a mais na temperatura mais baixa (manta térmica);
- e) medição da temperatura interna de um corpo de prova de cada temperatura de cura durante as primeiras 24 horas.

## 2.7 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

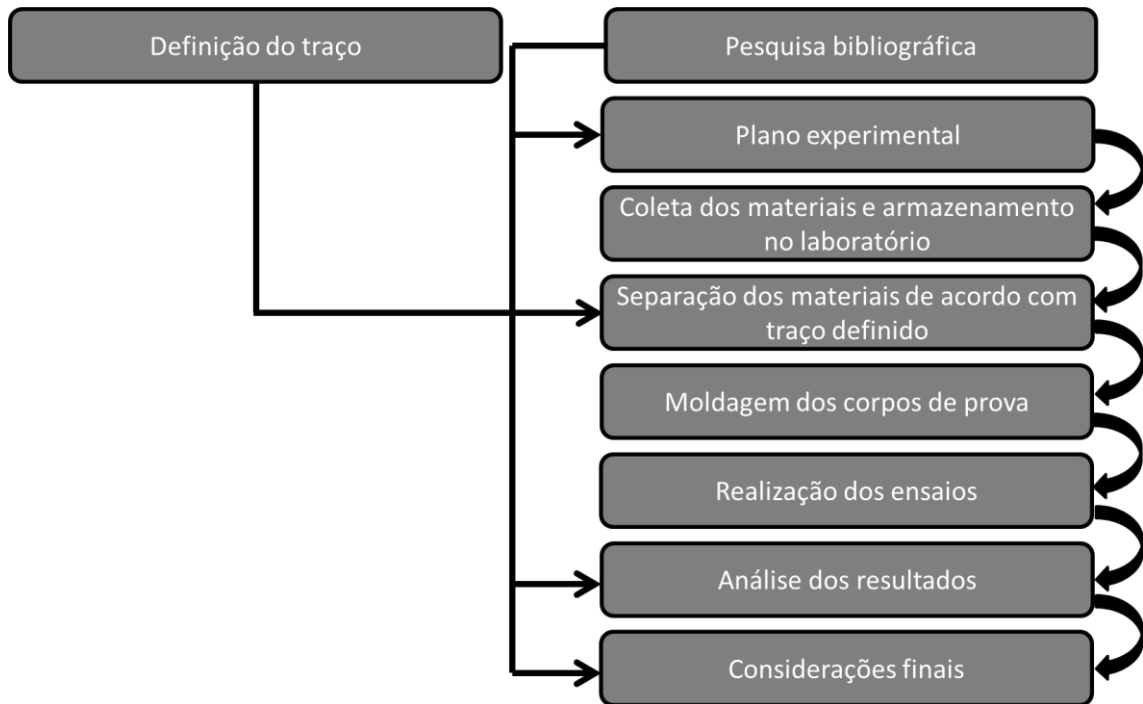
- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição do traço do concreto, fornecido pela construtora;
- c) elaboração do plano experimental;
- d) coleta dos materiais e armazenamento no laboratório;
- e) separação dos materiais de acordo com traço definido;
- f) moldagem dos corpos de prova;
- g) realização dos ensaios;
- h) análise dos resultados;
- i) considerações finais.

A primeira etapa do trabalho consiste na **pesquisa bibliográfica**, na qual será realizada a pesquisa técnica e científica na literatura disponível sobre os assuntos abordados no trabalho. O primeiro assunto é o material a ser utilizado, o concreto. Após isso a análise fica voltada a ensaios normatizados e a cura do concreto. Feita a pesquisa bibliográfica, será montado o **plano experimental**, visando planejar o andamento do trabalho, definir as variáveis e os ensaios que devem ser realizados.

Na terceira etapa é realizada a **coleta do material**, que foi fornecido por uma construtora a qual está executando uma obra de grande porte da região metropolitana de Porto Alegre. Posteriormente foi feito seu **armazenamento no laboratório** Norie, localizado na UFRGS, onde foram realizados os ensaios. Essa é uma etapa de grande importância no trabalho, devido à logística para busca do material e o armazenamento no laboratório, que por vezes é complicado devido a limitações do espaço físico.

Com o material devidamente armazenado foi feita sua **separação, de acordo com traço fornecido** pela construtora, para facilitar o momento da **moldagem dos corpos de prova** que se deu em três concretagens, devido à limitação do misturador do laboratório.

Figura 1– Diagrama das etapas do trabalho



(fonte: elaborado pelo autor)

Após moldados os corpos de prova foram **realizados os ensaios** definidos no plano experimental. Especialmente o ensaio de resistência à compressão do concreto e o ensaio de medição da temperatura interna dos corpos de prova foram realizados para posterior **análise dos resultados**. Por fim, fez-se a apresentação das **considerações finais**, onde se respondeu a questão da pesquisa.

### 3 CONCRETO

O concreto de cimento Portland é o mais importante material estrutural da atualidade. Mesmo sendo o mais recente dos materiais de construção de estruturas, pode ser considerado como uma das maiores descobertas interessantes da história do desenvolvimento da humanidade (HELENE; ANDRADE, 2010, p. 905).

Este capítulo tem por objetivo apresentar as principais informações sobre o concreto, como propriedades no estado fresco e endurecido, materiais constituintes, métodos de cura e influência da temperatura sobre suas características.

#### 3.1 CONCRETO: ASPECTOS GERAIS

Sobre o concreto, Helene e Andrade (2010, p. 905) afirmam que:

Sua descoberta no fim do século XIX e seu intensivo uso no século XX, que o transformaram no material mais consumido pelo homem depois da água, revolucionaram a arte de projetar e construir estruturas cuja evolução sempre esteve associada ao desenvolvimento das civilizações ao longo da história da humanidade.

Na antiguidade, os egípcios foram grandes construtores e dominaram a arte de construir estruturas com blocos de rocha, mas não esgotaram o enorme potencial desse material. Os engenheiros da idade média ainda levariam aos mais belos usos esse nobre material de construção, com a construção das espetaculares igrejas góticas, explorando os limites construtivos de estruturas em rocha.

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), existem três razões para esse material ser o mais usado na engenharia. Segundo os autores a primeira delas é possuir uma excelente resistência à água, ao contrário de materiais como madeira e aço comum, o que leva a ser empregado nas mais diversas estruturas destinadas a controlar, estocar e transportar a água. A segunda razão é pela facilidade com que o material pode fluir em superfícies com fôrmas pré-fabricadas, podendo-se reutilizá-las, após o endurecimento do concreto. A terceira razão é dada por ser, normalmente, o material mais barato e mais facilmente disponível no canteiro, aliado ao menor consumo de energia para sua produção.

Petrucci (1998, p. 4) lista os seguintes itens para se obter as qualidades essenciais do concreto:

- a) seleção cuidadosa dos materiais (cimento, agregado, água e aditivos) quanto a
  - tipo e qualidade;
  - uniformidade;
- b) proporcionamento correto
  - do aglomerante em relação ao inerte;
  - do agregado miúdo em relação ao graúdo;
  - da quantidade de água em relação ao material seco;
  - do aditivo em relação ao aglomerante ou à água utilizada;
- c) manipulação adequada quanto a
  - mistura;
  - transporte;
  - lançamento;
  - adensamento;
- d) cura cuidadosa.

### 3.2 MATERIAIS CONSTITUINTES

Sendo um dos materiais mais importantes para a construção civil, “O **concreto** é um material composto que consiste essencialmente de um meio contínuo aglomerante, onde estão mergulhadas partículas ou fragmentos de agregados.” (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 8, grifo dos autores). De acordo com Petrucci (1998, p. 1):

O concreto hidráulico é um material de construção constituído por mistura de um aglomerante com um ou mais materiais inertes e água. Quando recém-misturado, deve oferecer condições tais de plasticidade que facilitem as operações de manuseio indispensáveis ao lançamento nas formas, adquirindo, com o tempo, pelas reações que então se processarem entre aglomerante e água, coesão e resistência.

A definição de Helene e Andrade (2010) cita que a mistura de concreto deve conter cimento Portland e água, formando uma pasta fluida. Nessa pasta, os agregados, das mais diversas formas e tamanhos, são envolvidos formando um material que nas primeiras horas se mantém trabalhável se adaptando a qualquer tipo de forma geométrica. Após certo tempo, essa mistura

endurece devido às reações químicas entre o cimento e a água, gerando resistência mecânica e tornando-o um material com bom desempenho estrutural. O concreto de cimento Portland deve conter cimento, água, e agregados, além da possibilidade de contar com aditivos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições minerais (HELENE; ANDRADE, 2010, p. 920).

A seguir, estão detalhadas as partes constituintes do concreto, onde são apresentadas as funções de cada elemento no sistema.

### 3.2.1 Aglomerante

Segundo nota histórica citada por Neville (1997, p. 23):

O emprego de cimento é bem antigo. Os antigos egípcios usavam gesso impuro calcinado. Os gregos e romanos usavam calcário calcinado e aprenderam, posteriormente, a misturar cal e água, areia e pedra fragmentada, tijolos ou telhas em cacos. Foi o primeiro concreto da História. A argamassa de cal não endurece embaixo d'água e, para construções submersas, os romanos trituravam cal conjuntamente com cinzas vulcânicas ou telhas de barro cozido finamente trituradas. A sílica ativa e a alumina das cinzas reagia com a cal produzindo o que hoje se conhece como cimento pozolânico [...].

O aglomerante mais conhecido e mais utilizado no mundo, hoje, é o cimento Portland. De acordo com Petrucci (1998, p. 5), “O cimento Portland é um material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre.” O autor cita que esses materiais quando misturados com água, geram reações de hidratação e produzem o endurecimento da massa, oferecendo resistência ao sistema. A definição de Bauer (1987) é que o cimento Portland é um produto obtido pela pulverização do clínquer, que basicamente é constituído de silicatos hidráulicos de cálcio e sulfato de cálcio natural, em certas proporções.

Segundo Neville (1997, p. 24), “A partir da definição de cimento Portland pode-se constatar que esse material é constituído principalmente de material calcário, alumina e sílica, encontrados como argilas ou xisto.” O autor também menciona o processo de fabricação do cimento Portland, que consiste essencialmente em moer a matéria prima em proporções adequadas e queimar, em altas temperaturas, em um forno rotativo até uma temperatura de 1450 °C, aproximadamente. Com a alta temperatura, os materiais sofrem fusão, formando

pelotas, conhecidas como clínquer. Quando resfriado, se adiciona uma porcentagem de gipsita, finalmente resultando no cimento Portland.

Existe uma grande importância no conhecimento das proporções dos compostos constituintes do cimento, para haver uma correlação entre as propriedades finais do cimento com o concreto. Entre esses compostos, Bauer (1987, p. 36) cita:

O silicato tricálcico ( $C_3S$ ) é o maior responsável pela resistência em todas as idades, especialmente até o fim do primeiro mês de cura. O silicato bicálcico ( $C_2S$ ) adquire maior importância no processo de endurecimento em idades mais avançadas, sendo largamente responsável pelo ganho de resistência a um ano ou mais.

O aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) também contribui para a resistência, especialmente no primeiro dia. O ferro aluminato de cálcio ( $C_4AF_e$ ) em nada contribui para a resistência.

De acordo com Petrucci (1998) os cimentos brasileiros são constituídos, em média, por 42 a 60% de  $C_3S$ , 14 a 35% de  $C_2S$ , 6 a 13% de  $C_3A$  e 5 a 10% de  $C_4AF_e$  e afirma que os dois silicatos são os compostos fundamentais do ponto de vista de resistência.

Segundo Brunauer e Copeland<sup>1</sup> (1964, apud MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 199):

A química do concreto é essencialmente a química da reação entre o cimento Portland e a água. Em qualquer reação química os principais pontos de interesse são as transformações da matéria, as variações de energia, e a velocidade de reação. Esses três aspectos de uma reação tem grande importância prática para o usuário do cimento Portland. O conhecimento das substâncias formadas quando o cimento Portland reage é importante, pois o cimento em si mesmo não é um material cimentante; os seus produtos de hidratação que sim, têm propriedades aglomerantes. O conhecimento da quantidade de calor liberado é importante porque o calor de hidratação é algumas vezes favorável e outras vezes é desfavorável [...]

### 3.2.1.1 Hidratação do cimento

A hidratação do cimento é gerada por reações químicas e “[...] durante o processo de endurecimento do cimento, considerável quantidade de calor se desenvolve nas reações de hidratação.” (BAUER, 1987, p. 47). O autor cita que o interesse no conhecimento a cerca do calor de hidratação reside no estudo da evolução térmica durante seu endurecimento, principalmente em casos que existe grande massa de concreto.

---

<sup>1</sup> S. Brunauer and L. E. Copeland, “The Chemistry of Concrete”, Sci. Am., April 1964

Os compostos presentes no cimento Portland são anidros, mas quando postos em contato com a água, reagem com ela, formando produtos hidratados (PETRUCCI, 1998, p. 12). As reações de hidratação dos compostos do cimento Portland são exotérmicas (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 206). Segundo os autores, os compostos do cimento são produtos de reações de alta energia, e quando em contato com a água, são hidratados atingindo estados de baixa energia, logo, liberando energia na forma de calor.

O calor de hidratação do cimento pode ser considerado bom em algumas situações e ruim em outras, sendo bastante influenciado pela temperatura em que o concreto está exposto. Mehta e Monteiro (1994, p. 206) exemplificam:

O calor de hidratação pode muitas vezes ser um problema (por exemplo, em estruturas de concreto massa), e outras tantas vezes um auxílio (por exemplo, em concretagens durante o inverno quando a temperatura ambiente pode ser muito baixa para fornecer energia de ativação para as reações de hidratação). A quantidade total de calor liberado e as taxas de liberação de calor pela hidratação dos compostos individuais podem ser usadas como índices de suas reatividades.

### 3.2.1.2 Pega e endurecimento

Um cimento misturado com certa quantidade de água, obtendo-se uma mistura plástica, começa a perder esta plasticidade depois de um certo tempo (PETRUCCI, 1998, p. 16). A pega e o endurecimento se inserem no mesmo processo de hidratação do cimento, mas em tempos diferentes. A pega do cimento, por sua vez “[...] compreende a evolução das propriedades mecânicas da pasta no início do processo de endurecimento, propriedades essencialmente físicas [...]” (BAUER, 1987, p. 42). De acordo com o autor, nesse processo, os grãos que inicialmente se encontram em suspensão, vão se aglutinando uns com os outros, construindo um esqueleto sólido, gerando a estabilidade da estrutura. Já no processo de endurecimento, após determinado tempo, a pasta já não é mais trabalhável e deve permanecer em repouso, nos moldes determinados, para permitir o desenvolvimento do endurecimento.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), o termo pega significa a solidificação da pasta de cimento, e o endurecimento é o ganho de resistência com o tempo, devido às reações químicas, preenchendo os espaços vazios, diminuindo-se a porosidade e a permeabilidade e aumentando-se a resistência.



A caracterização da pega dos cimentos é feita pela determinação de dois tempos distintos, o tempo de início e o tempo de fim de pega (BAUER, 1987, p. 42). Mehta e Monteiro (1994, p. 208, grifo dos autores) definem:

O começo da solidificação chamado **início de pega** marca o ponto no tempo em que a pasta se torna não trabalhável. Consequentemente, o lançamento, compactação e acabamento do concreto após este estágio seria muito difícil. A pasta não se solidifica repentinamente; necessita de um tempo considerável para tornar-se totalmente rígida. O tempo necessário para solidificar completamente marca o tempo de **fim de pega**, o qual não deverá ser tão longo a fim de se retomar a atividade construtiva dentro de um tempo razoável após o lançamento do concreto.

Segundo Petrucci (1998), o início da pega evidencia um aumento na viscosidade de pasta e elevação da temperatura. O fim da pega é o momento em que a pasta não se deforma mais com pequenas cargas e se torna um bloco rígido. A importância da determinação desses parâmetros é fundamental para se ter ideia do tempo disponível para trabalhar, transportar, lançar e adensar os materiais.

### 3.2.2 Agregados

Entende-se por agregado um “[...] material granular, sem forma e volume definidos, geralmente inerte, de dimensão e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia.” (PETRUCCI, 1998, p. 38). O estudo dos agregados deve ser encarado como um dos principais pontos da tecnologia do concreto, sobretudo se levar em conta que cerca de 70% dos materiais do concreto são constituídos pelos agregados (BAUER, 1987, p. 63). O autor ainda cita como principais vantagens dos agregados, o baixo custo por unidade de volume do concreto, redução da retração e aumento da resistência ao desgaste.

#### 3.2.2.1 Características do agregado

A seguir são apresentadas as características dos agregados miúdo e graúdo.

##### 3.2.2.1.1 Aderência do agregado

Segundo Neville (1997, p. 134) “A aderência é devida, em parte, ao intertravamento do agregado e da pasta de cimento hidratada, devida à aspereza da superfície das partículas de agregado.”.

### 3.2.2.1.2 Resistência do agregado

Neville (1997) cita que é difícil ensaiar a resistência do agregado isoladamente, e que usualmente essa resistência é encontrada por determinações indiretas. O autor afirma que a resistência à compressão do concreto não deve ser significativamente maior que a resistência da maior parte dos agregados. Na produção de concreto normal, os agregados naturais comumente usados são “[...] densos e resistentes; portanto, raramente são um fator limitante da resistência e propriedades elásticas do concreto endurecido.” (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 259).

### 3.2.2.1.3 Massa específica

Propriedade de extrema importância para dosagem do concreto, a massa específica “[...] é a relação entre o peso e o volume de cheios, isto é, o volume dos grãos do agregado.” (BAUER, 1987, p. 78). Mehta e Monteiro (1994) definem massa específica como a massa do material por unidade de volume, incluindo os poros internos das partículas, que variam de 10 a 40 por cento para arenitos e calcários, 5 por cento para rochas sedimentares densas e 2 por cento para rochas ígneas intrusivas.

### 3.2.2.1.4 Massa unitária

Mehta e Monteiro (1994) definem massa unitária como a massa das partículas de agregado que ocupam uma unidade de volume. Nessa propriedade os espaços vazios entre as partículas são considerados e os autores apontam que conhecê-la é de grande importância, pois a massa unitária é fundamental para transformar o traço de concreto de massa para volume, unidade comumente utilizada em obra.

### 3.2.2.1.5 Porosidade e absorção

A porosidade e a absorção dos agregados “[...] influenciam propriedades tais como aderência entre o agregado e a pasta de cimento hidratada [...]” (NEVILLE, 1997, p. 144). Segundo o autor, os poros variam muito de tamanho em um agregado, indo de microscópicos a vistos a olho nu. A pasta de cimento, devido a sua viscosidade, apenas penetra em poros maiores. Já a água pode ser absorvida em maiores quantidades, alterando a relação água/cimento do concreto em alguns casos e podendo influenciar na resistência mecânica do sistema.

### 3.2.2.2 Classificação

Conforme Bauer (1987), os agregados podem ser naturais, os quais são encontrados na natureza sob a forma de agregado, e artificiais, que necessitam de um processo especial para atingir a condição necessária para uso. A classificação apontada por Mehta e Monteiro (1994) segue o mesmo raciocínio, dividindo-se em naturais e artificiais, e os autores mostram que os agregados comumente utilizados, são areia, pedregulho e pedra britada.

Segundo Mehta e Monteiro (1994, p. 240, grifo dos autores):

[...] o **agregado graúdo** é usado para descrever partículas maiores que 4,8 mm (retidas na peneira N° 4), e o termo **agregado miúdo** é usado para partículas menores que 4,8 mm; tipicamente, os agregados miúdos contêm partículas que variam, em dimensão, de 75 µm (peneira N° 200) a 4,8 mm, e os agregados graúdos de 4,8 mm até cerca de 50 mm, exceto para concreto massa, que pode conter agregado graúdo de até 150 mm.

Tem-se ainda a classificação segundo a massa específica, que de acordo com Petrucci (1998), pode ser dividida em agregados leves, normais e pesados. Os agregados normais citados são a areia, seixos e pedra britada, os leves são pedra-pomes, vermiculita e argila expandida e os pesados barita, magnetita e limonita.

### 3.2.2.3 Qualidade dos agregados

Bauer (1987, p. 73) cita os principais índices de qualidade dos agregados como:

- a) resistência aos esforços mecânicos – compressão e abrasão;
- b) substâncias nocivas – torrões de argila, matérias carbonosas e material pulverulento;
- c) impurezas orgânicas;
- d) estabilidade com sulfatos de sódio e magnésio (durabilidade);
- e) forma dos grãos.

Todo e qualquer agregado, antes de ser usado para concretos ou argamassas, deve passar pelos testes de qualidade citados acima. Todos os ensaios são normatizados e facilmente encontrados na bibliografia.

### 3.2.3 Água de amassamento

A qualidade da água tem um importante papel, tanto na mistura do concreto quanto na cura, onde “[...] impurezas contidas na água podem influenciar negativamente a resistência do concreto ou causar manchamento na sua superfície, ou, também, resultar corrosão da armadura.” (NEVILLE, 1997, p. 193). A NBR 15900 (ABNT, 2009) cita os tipos de água que podem ser empregados na mistura do concreto e se são necessários ensaios para certificar a qualidade, no caso da água de abastecimento público, por exemplo, não são necessários ensaios, podendo ser empregada diretamente.

Petrucci (1998) afirma que pequenas quantidades de impurezas na água podem ser toleradas, pois aparentemente não apresentam efeitos danosos ao concreto. O autor comenta que o maior defeito proveniente da água é o excesso dela empregada no amassamento e não as impurezas que nela estão contidas.

### 3.2.4 Aditivos

Atualmente, existe uma gama muito grande de aditivos que podem ser utilizados em concretos e argamassas. Deve-se tomar cuidado com o uso de certos aditivos, pois em proporções ou utilizações erradas, podem causar danos graves ao sistema em que são inseridos.

Entende-se por aditivos “[...] substâncias que são adicionadas ao concreto, com a finalidade de reforçar ou melhorar certas características [...]” (PETRUCCI, 1998, p. 79). O autor os classifica em:

- a) plastificantes;
- b) incorporadores de ar;
- c) produtos de cura;
- d) dispersores;
- e) impermeabilizantes;
- f) produtores de gás ou espuma.

A NBR 11768 (ABNT, 1992) classifica os aditivos em:

- a) plastificante (tipo P): produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de, no mínimo, 6% da quantidade de água de amassamento para produzir um concreto com determinada consistência.
- b) retardador (tipo R): produto que aumenta os tempos de início e fim de pega do concreto.
- c) acelerador (tipo A): produto que diminui os tempos de início e fim de pega do concreto, bem como acelera o desenvolvimento das suas resistências iniciais.
- d) plastificante retardador (tipo PR): produto que combina os efeitos dos aditivos plastificante e retardador.
- e) plastificante acelerador (tipo PA): produto que combina os efeitos dos aditivos plastificante e acelerador.
- f) incorporador de ar (tipo IAR): produto que incorpora pequenas bolhas de ar ao concreto.
- g) superplastificante (tipo SP): produto que aumenta o índice de consistência do concreto mantida a quantidade de água de amassamento, ou que possibilita a redução de, no mínimo, 12% da quantidade de água de amassamento, para produzir um concreto com determinada consistência.
- h) superplastificante retardador (tipo SPR): produto que combina os efeitos dos aditivos superplastificante e retardador.
- i) superplastificante acelerador (tipo SPA): produto que combina os efeitos dos aditivos superplastificante e acelerador.

Conforme nota de Neville (1997), os aditivos cujos desempenhos são conhecidos em temperaturas normais podem não se comportar da mesma forma em altas ou baixas temperaturas. O autor também cita que aditivos conhecidos separadamente, podem não ser compatíveis quando usados conjuntamente, sendo necessário o uso de misturas experimentais.

### **3.2.5 Adições**

As adições minerais, incorporadas à mistura do concreto, são compostas por materiais muito finos. Esses materiais podem ser obtidos através de resíduos de, por exemplo, fornos metalúrgicos que produzem ferro fundido, silício metálico e ligas de ferro-silício. Quando se consegue aproveitá-los, substituindo parte do cimento por eles, obtém-se uma economia significativa de custo e energia (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Essas adições, segundo os autores, podem ser classificadas em materiais naturais e subprodutos.

Entre os materiais naturais, são citados vidros, tufos vulcânicos, argilas, folhelhos calcinados e terra diatomácea. Esses materiais passam por processos de britagem, moagem, classificação por tamanho, com o único propósito de se produzir uma pozolana (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Entre os subprodutos são citados a cinza volante, a escória granulada de alto forno, a sílica ativa e a cinza de casca de arroz, que são resultantes de outros processos. Silva (2007, p. 761) os classifica considerando sua reatividade, materiais não reativos (fíler calcário), materiais pozolânicos (cinza volante e sílica ativa) e materiais cimentícios (escórias de alto forno).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a incorporação de partículas finas mostra uma melhora frente à exsudação, à segregação e a trabalhabilidade de um concreto fresco recém-misturado. Quanto mais finas essas partículas, menos material é necessário para aumentar a coesão e, conseqüentemente, a trabalhabilidade.

### 3.3 PROPRIEDADES DO CONCRETO

Depois de conhecer todos os materiais constituintes do concreto, nessa seção serão abordadas suas propriedades no estado plástico, quando ainda pode se moldar a qualquer superfície, no estado endurecido, quando não mais se deforma quando submetido a tensões, cura do concreto e algumas influências que a temperatura causa nas suas propriedades.

#### 3.3.1 Concreto no estado plástico

Embora o concreto fresco tenha interesse apenas transitório, sua resistência final pode ser seriamente influenciada pelo seu grau de adensamento (NEVILLE, 1997, p. 193). Portanto, é essencial que sua mistura seja capaz de ser transportada, lançada, adensada e acabada sem que ocorra nenhum fator que o influencie negativamente.

##### 3.3.1.1 Trabalhabilidade

Neville (1997) define trabalhabilidade como um concreto que pode ser adensável. Essa definição fica muito vaga, sendo que para situações específicas, pode-se necessitar de uma trabalhabilidade distinta, por exemplo, em concreto massa onde é muito baixa. Dessa forma o

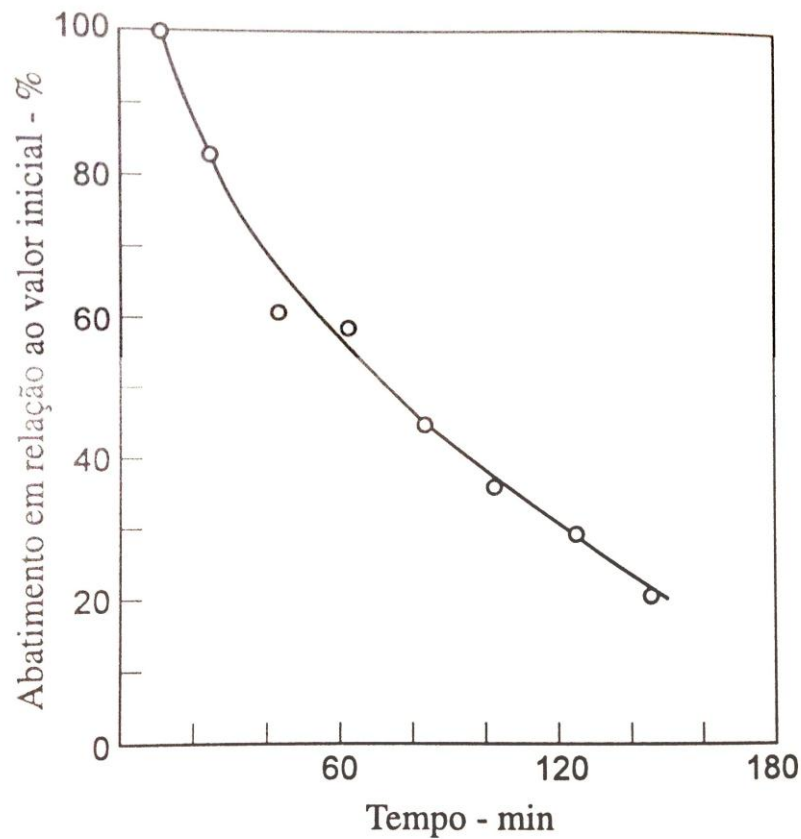
autor a específica como “[...] uma propriedade física inerente ao concreto sem referência às circunstâncias de um tipo particular de construção.” (NEVILLE, 1997, p. 195). Petrucci (1998) a coloca como a característica mais importante do concreto fresco.

De acordo com Neville (1997), a trabalhabilidade é uma propriedade essencial para o produto final, a qual deve possibilitar um adensamento máximo com uma quantidade de energia razoável. Com adensamento tem-se o intuito de obter a maior massa específica possível, retirando-se os espaços vazios.

O principal fator que influencia na trabalhabilidade é o teor de água da mistura, que também pode ser influenciada pela quantidade de ar incorporado. Fixando-se o teor de água e outras proporções da mistura é o tamanho máximo do agregado, sua granulometria, forma e textura quem nos fornece a trabalhabilidade do concreto (NEVILLE, 1997). Com definições similares, Mehta e Monteiro (1994) separa em quatro principais fatores que podem influenciar na trabalhabilidade, são eles o consumo de água, o consumo de cimento, as características dos agregados e os aditivos.

A trabalhabilidade, de acordo com Neville (1997, p. 199), pode ser determinada por vários ensaios. O mais comum é o ensaio de abatimento, mais conhecido por *slump test*, que de acordo com o autor “[...] é muito útil para detecções de variações da uniformidade de uma mistura com determinadas proporções nominais.” Ao autor, através da figura 2, demonstra que independente de qualquer variável da composição do concreto, a trabalhabilidade é diretamente influenciada pelo tempo.

Figura 2 – Perda de abatimento em função do tempo transcorrido desde o início da mistura



(fonte: NEVILLE, 1997, p. 212)

Dentre os fatores já citados, Petrucci (1998, p. 82) os separa em dois grupos:

a) fatores internos

- consistência, que pode ser identificada pela reação água/cimento ou teor de água/materiais secos;
- proporção entre cimento e agregado, usualmente denominada traço;
- proporção entre agregado miúdo e graúdo, que corresponde à granulometria do concreto;
- forma do grão dos agregados, em geral dependendo do modo de obtenção (agregados em estado natural e obtido por britagem);
- aditivos com finalidade de influir na trabalhabilidade, normalmente denominados plastificantes.

b) fatores externos

- tipo de mistura (manual ou mecanizada);



- tipo de transporte, quer quanto ao sentido vertical ou horizontal, quer quanto ao meio de transporte: em guinchos ou vagonetes, calhas e bombas;
- tipo de lançamento, de pequena ou grande altura: por pás, calhas, trombas de elefante, etc.;
- dimensões e armadura da peça a executar.

### 3.3.1.2 Segregação e exsudação

Conforme definição de Mehta e Monteiro (1994, p. 357), a segregação consiste na separação dos agregados da argamassa do concreto. A exsudação é classificada como um fenômeno cuja manifestação é o aparecimento de água na superfície do concreto após o mesmo ter sido lançado e adensado.

Neville (1997, p. 214) define a segregação como “[...] a separação dos constituintes de uma mistura heterogênea de modo que sua distribuição deixe de ser uniforme.” Mehta e Monteiro citam algumas causas para ocorrência da segregação, como quantidade excessiva de agregados graúdos, pouca quantidade de partículas finas e métodos impróprios de adensamento e lançamento.

A exsudação, segundo Petrucci (1998), é motivada pelas características dos materiais constituintes terem maior ou menor possibilidade de manter a água na mistura. Quando ocorre, causa a subida da água, tornando a superfície mais porosa e menos resistente, ficando sujeita à desintegração. Neville (1997) complementa afirmando que a tendência à exsudação depende muito das propriedades do cimento, por exemplo, quanto mais fino, mais rápido se hidrata e menor é sua velocidade de sedimentação, diminuindo a chance de exsudação.

### 3.3.2 Concreto no estado endurecido

Mehta e Monteiro (1994) trazem como propriedades do concreto endurecido a resistência à compressão e à tração, as deformações e a durabilidade (permeabilidade e deterioração por reações com materiais deletérios), os quais serão abordados a seguir.

### 3.3.2.1 Resistência à compressão

Mehta e Monteiro (1994) explicam que a resistência à compressão é basicamente influenciada pela porosidade do sistema. Os autores classificam os principais fatores que afetam a resistência à compressão em:

- a) **relação água cimento:** indiscutivelmente o mais importante, pois afeta a porosidade tanto da matriz pasta de cimento como da zona de transição entre a matriz e o agregado. Para relação abaixo de 0,30, os autores citam que se pode conseguir um aumento significativo na resistência com pequenas reduções, devido ao fato de se ter uma melhora significativa na zona de transição;
- b) **ar incorporado:** quando adicionados vazios ao sistema, através de aditivos incorporadores de ar ou mau adensamento do concreto, são geradas maiores porosidades, assim diminuindo-se a resistência;
- c) **tipo de cimento:** a influência fica limitada às primeiras idades e se dá pela velocidade de hidratação distinta de cada cimento;
- d) **agregado:** geralmente se desconsidera a resistência do agregado, por ser maior que a da matriz. Os fatores que são levados em conta são: tamanho, forma, textura da superfície, granulometria e mineralogia;
- e) **água de amassamento:** pode afetar a resistência pelo excesso de impurezas, que pode vir a causar eflorescência ou corrosão da armadura;
- f) **aditivos:** os mais comuns, plastificantes, tem papel importante na redução da relação água/cimento, mantendo a mesma trabalhabilidade. Com essa redução aumenta-se a resistência.

### 3.3.2.2 Resistência à tração

Há uma relação direta entre a resistência à tração e à compressão, mas não existe uma linearidade entre elas. Mehta e Monteiro (1994) quantificam essa relação, aproximadamente, de 10 a 11% para concretos de baixa resistência, 8 a 9% para concretos de média resistência e 7% para concretos de alta resistência. Segundo os autores, engenheiros que trabalham com concreto armado acabam desprezando o valor da dessa resistência por usarem o aço para absorver as cargas de tração.

### 3.3.2.3 Deformações

As deformações no concreto ocorrem como resposta do material à carga externa e ao meio ambiente. Mehta e Monteiro (1994, p. 82, grifo dos autores) citam dois tipos de deformações quando expostos a temperatura e umidade do ambiente. A **contração térmica**, que ocorre

pela contração associada ao resfriamento, e a **retração por secagem**, que ocorre devido à perda de umidade.

A importância do conhecimento das deformações é abordada por Petrucci (1998, p. 103), pela possibilidade de fissuração no concreto, resultando em caminhos para penetração de agentes agressivos. O autor lista as tendências à fissuração do concreto armado de acordo com os seguintes fatores:

- a) resistência do concreto;
- b) relação entre a resistência do concreto e aço;
- c) variações dimensionais devidas à retração;
- d) espessura do cobrimento da armadura.

#### 3.3.2.4 Durabilidade

Quando se projeta uma estrutura de concreto deseja-se que ela seja estável, segura e durável. Sobre a durabilidade, Neville (1997, p. 482) indica como essencial que:

[...] as estruturas de concreto desempenhem as funções que lhe foram atribuídas, que mantenham a resistência e a utilidade que delas se espera, durante um período de vida previsto, ou pelo menos, razoável. Portanto, o concreto deve poder suportar o processo de deterioração ao qual se supõe que venha a ser submetido. Nessas condições, o concreto é considerado durável.

Segundo Bauer (1987) a durabilidade dos elementos construtivos de concreto é condicionada aos ataques de agentes agressivos a que esses elementos estão sujeitos durante sua vida em serviço. Essas causas e fatores são de diferentes origens e agem por diferentes mecanismos, os quais são classificados pelo autor de acordo com a tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos agentes agressivos

Agentes	Concreto	Armadura
Mecânicos	Abrasão, choques, vibração, fadiga	
Físicos	Temperatura	
Físico-químicos		Corrosão eletroquímica Corrosão sob tensão
Ecológicos Químicos	Águas puras Águas carbônicas Águas sulfatadas Água do mar Agentes reativos	Oxidação
Intrínsecos	Reação álcali-agregado	
Biológicos	Bactérias	

(fonte: BAUER, 1987, p. 270)

Sobre os agentes químicos, Neville (1997) cita três principais fluidos que podem ingressar no concreto afetando sua durabilidade. A água, pura ou com íons agressivos, o dióxido de carbono e o oxigênio. A entrada desses agentes está ligada à permeabilidade do concreto que geralmente depende da estrutura da pasta de cimento hidratada.

Mehta e Monteiro (1994) afirmam que o principal componente que influencia na durabilidade do concreto é a água, que é o agente primário tanto da criação quanto da destruição dos materiais na natureza. Os autores apontam que em sólidos porosos, sabe-se que a água é a causa de muitos processos físicos de degradação e também pode ser a causa de processos químicos de degradação, atuando como veículo para o transporte de íons agressivos para o interior do material.

### 3.3.3 Cura do concreto

Como principal variável de estudo do trabalho a “[...] **cura do concreto** trata dos procedimentos destinados a promover a hidratação do cimento, consistindo no controle do tempo, temperatura e condições de umidade, imediatamente após a colocação do concreto nas fôrmas.” (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 57, grifo dos autores).

De acordo com Neville (1997), o objetivo da cura é manter o concreto saturado até que os espaços da pasta de cimento fresca sejam preenchidos pelos produtos de hidratação do cimento até uma condição desejável. Para Bauer (1987, p. 228), é “[...] um conjunto de medidas que têm por objetivo evitar a evaporação da água utilizada na mistura do concreto e que deverá reagir com o cimento, hidratando-o.”.

Neville (1997, p. 329) afirma que a cura não é homogênea para toda a forma do concreto e que:

[...] o concreto mais afastado da superfície exposta, isto é, em maior profundidade, é muito pouco sujeito aos deslocamentos de umidade, que somente atinge a parte externa, tipicamente até 30 mm da superfície, mas ocasionalmente, até 50 mm. Em concreto armado, essa profundidade representa sempre, ou quase sempre, a espessura do cobrimento.

Assim, o concreto, no interior de uma peça estrutural geralmente não é atingido pelos efeitos da cura, de modo que a cura é de pouca importância com relação à resistência estrutural, com exceção do caso de peças muito delgadas. Por outro lado, as propriedades do concreto na região externa são muito influenciadas pela cura; é o concreto dessa região que é sujeito a intemperismo, carbonatação e abrasão, e a permeabilidade dessa região tem uma excepcional influência sobre a proteção do aço da armadura contra a corrosão.

Petrucci (1998, p. 188) lista alguns processos que podem ser realizados para cura do concreto na obra:

- a) irrigação periódica das superfícies;
- b) recobrimento das superfícies com areia, ou sacos de aniagem rompidos, que são mantidos sempre úmidos;
- c) emprego de compostos impermeabilizantes de cura;
- d) recobrimento da superfície com papéis impermeáveis especiais (Sizalkraft), que, impedindo a evaporação, dispensam o uso de água;

Quanto ao tempo de cura, Bauer (1987) afirma que é preciso ser levado em conta as exigências técnicas, que determinam que seja o mais longo possível, e as exigências econômicas, que o restringem ao máximo.

Segundo Mehta e Monteiro (1994) quanto maior o período de cura úmida, maior a resistência atingida, pois se admite que as hidratações das partículas de cimento anidro continuam ocorrendo. Os autores indicam um período mínimo de 7 dias de cura úmida para um concreto com cimento Portland. Já para concretos com cimentos compostos ou com adições minerais é

desejável um período de cura maior, para garantir as contribuições na resistência das reações pozolânicas. A NBR 14931 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, p. 23) não cita prazo mínimo para cura do concreto, apenas indica que enquanto não se atingir um endurecimento satisfatório o concreto deve ser curado e protegido contra agentes prejudiciais.

### 3.3.4 Influências da temperatura sobre o concreto

De acordo com Troxell e Davis<sup>2</sup> (1956, apud BAUER, 1997, p. 230), as temperaturas favoráveis a uma boa cura situam-se entre 15 e 35 °C. Nesse intervalo, nota-se um relativo aumento na resistência do concreto com a elevação da temperatura, caso for conservado úmido durante período suficientemente longo.

Petrucci (1998, p. 188) lista três pontos importantes sobre a temperatura:

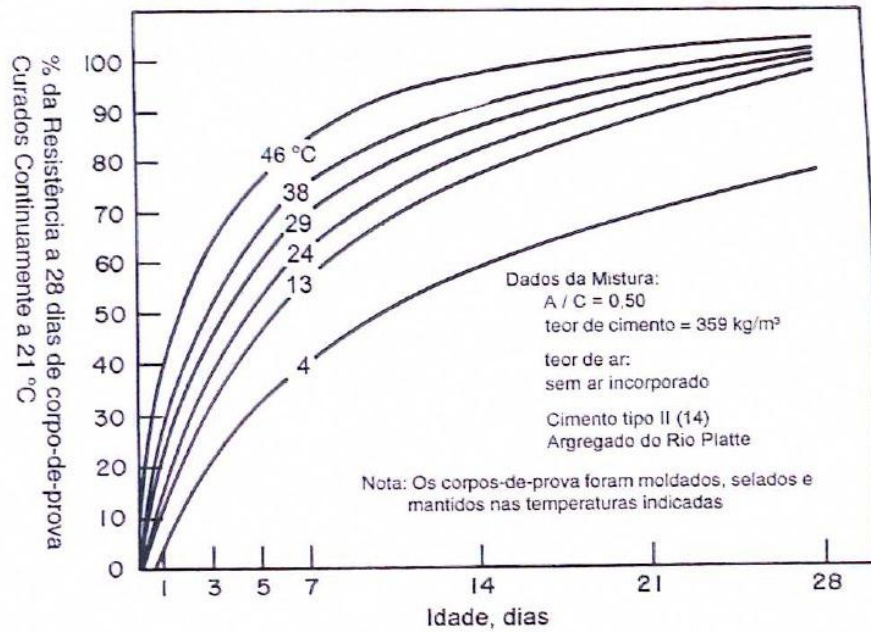
- a) as condições de temperatura nos primeiros dias são as mais importantes;
- b) a baixa temperatura prejudica enormemente o crescimento da resistência;
- c) é possível a recuperação parcial da resistência após uma baixa acentuada de temperatura, desde que não seja muito prolongada, pela exposição a condições normais.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a resistência do concreto pode ser afetada pela temperatura do lançamento do concreto e pela temperatura de cura. Conforme figura 3, para concretos moldados e curados a uma mesma temperatura, quanto mais elevada essa temperatura, maior a resistência ao longo do tempo. Para concretos moldados a diferentes temperaturas e curados com uma temperatura padrão de 21 °C, conforme figura 4, quanto menor a temperatura de moldagem maior a resistência.

---

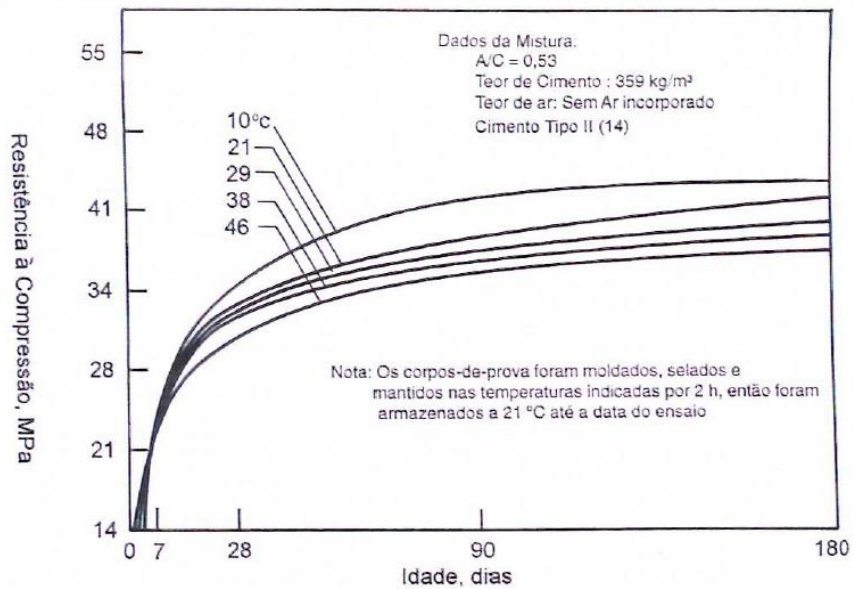
<sup>2</sup> TROXELL, G. E. & DAVIS, H. E. Composition and properties of concrete. New York, McGraw-Hill, 1956.

Figura 3 – Influência das temperaturas e moldagem de cura sobre a resistência do concreto



(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 59)

Figura 4 – Influência das temperaturas e moldagem de cura sobre a resistência do concreto



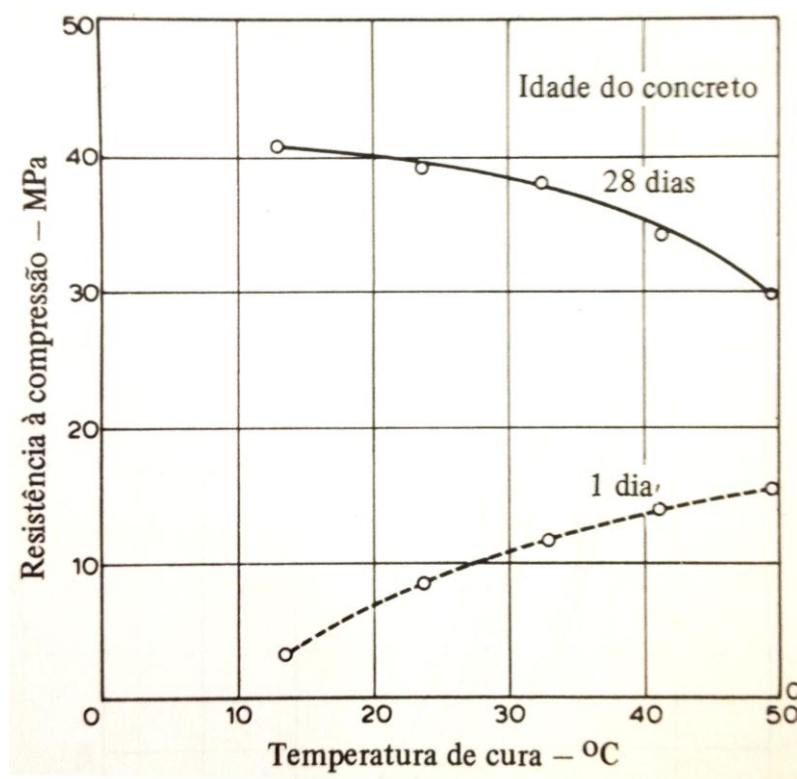
(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 59)

Segundo Verbeck e Helmut<sup>3</sup> (1968, apud NEVILLE, 1997, p. 366):

[...] a hidratação rápida a temperaturas mais altas retarda a hidratação subsequente e produz uma distribuição não uniforme dos produtos da hidratação no interior da pasta. Isso se deve a que, com uma grande velocidade inicial de hidratação, não há tempo suficiente para a difusão dos produtos para posições mais distantes das partículas de cimento e para uma precipitação uniforme nos espaços intersticiais, como ocorre a temperaturas mais baixas. Como resultado, se forma uma grande quantidade de produtos de hidratação nas vizinhanças das partículas que estão se hidratando, o que retarda a hidratação subsequente e prejudica a resistência a longo prazo.

A abordagem dos autores fica clara na figura 5, onde se pode notar que aumentando a temperatura nas primeiras idades, prejudica-se a resistência aos 28 dias.

Figura 5 – Influência da temperatura de cura sobre a resistência à compressão a 1 dia e a 28 dias (corpos de prova ensaiados depois de resfriados a 23°C durante duas horas)<sup>3</sup>



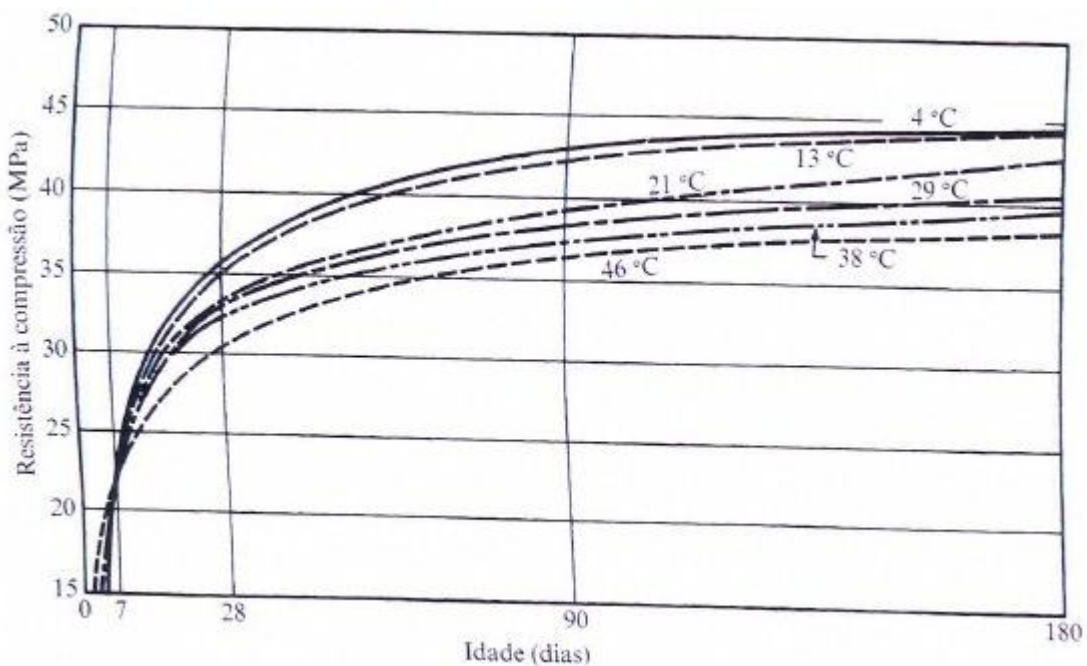
(fonte: NEVILLE, 1997, p. 368)

<sup>3</sup> G. J. Verbeck and R.A. Helmut, Structures and physical properties of cement paste. Proc. 5th Int. Symp. on the Chemistry of Cement, Tokyo, Vol. 3, pp. 1-32 (1968).



Na figura 6, Price<sup>4</sup> (1951, apud NEVILLE, 2016, p. 377) apresenta o efeito da temperatura durante as primeiras duas horas após a mistura no desenvolvimento da resistência do concreto. As temperaturas de cura estudadas foram de 4°C a 46°C e após duas horas todos corpos de prova foram curados a 21°C. Nota-se que as quanto menores as temperaturas de cura maiores as resistências à compressão.

Figura 6 – Efeito da temperatura durante as duas primeiras horas após a moldagem sobre o desenvolvimento da resistência (todos os corpos de prova selados e, após, duas horas curados a 21 °C).

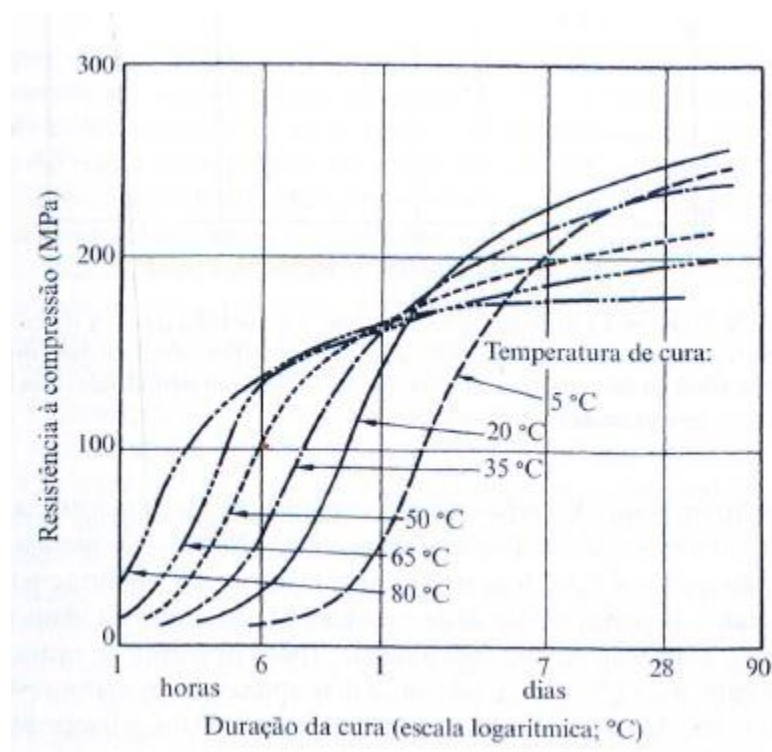


(fonte: NEVILLE, 2016, p. 377)

Identifica-se, na figura 7, a mesma tendência no estudo de Verbeck e Helmut (1968, apud NEVILLE, 1997, p. 379), onde nota-se que temperaturas mais baixas apresentaram maiores resistências para maiores idades, porém especificamente neste estudo a maior resistência foi atingida com a temperatura de cura de 20°C. Os ensaios foram realizados com corpos de prova de alta resistência moldados apenas com pasta de cimento.

<sup>4</sup> W.H. Price, Factors influencing concrete strength, J. Amer. Concr. Inst., 47, pp. 417-32 (Feb. 1951).

Figura 7 – Relação entre a resistência à compressão e a duração da cura de compactos de pasta de cimento pura em diferentes temperaturas de cura. A temperatura dos corpos de prova foi mantida constante até e durante o período do ensaio.

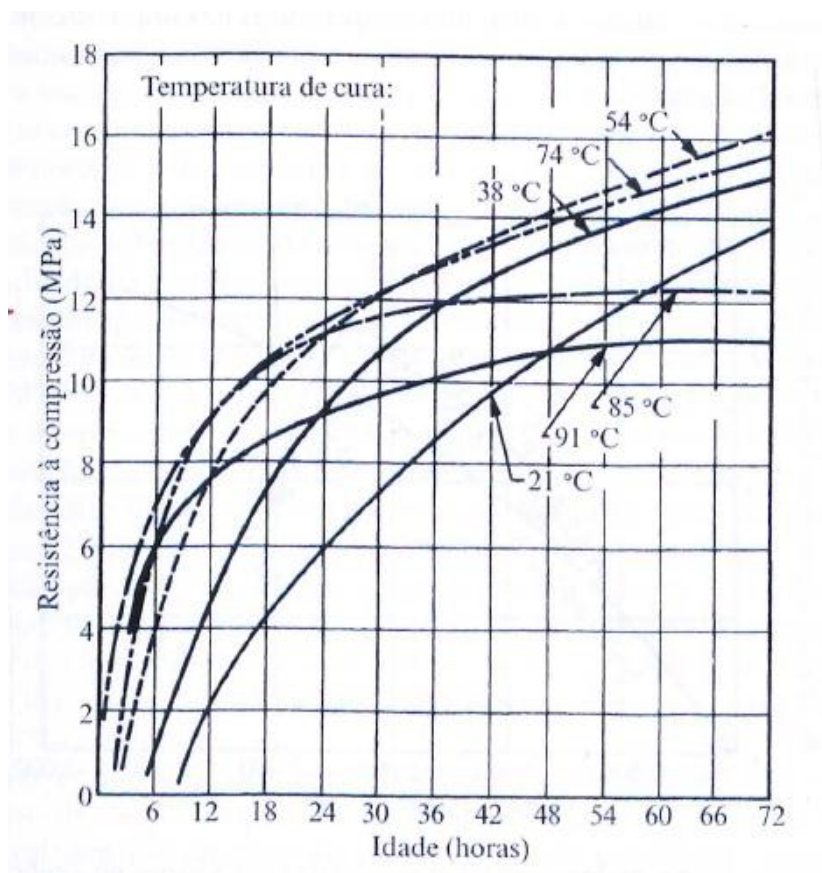


(fonte: NEVILLE, 2016, p. 379)

Em concretos curados termicamente a vapor, os estudos de U.S. Bureau of Reclamation<sup>5</sup> (1975, apud NEVILLE, 2016, p. 383) apresentam, para temperaturas mais elevadas, a mesma tendência de resistências citadas acima, para as primeiras 72 horas, conforme se pode verificar na figura 8. Os ensaios foram realizados com corpos de prova moldados com cimento CP-II e a cura foi aplicada imediatamente após a moldagem.

<sup>5</sup> U.S. Bureau of Reclamation, Concrete Manual, 8th Edn (Denver, Colorado, 1975).

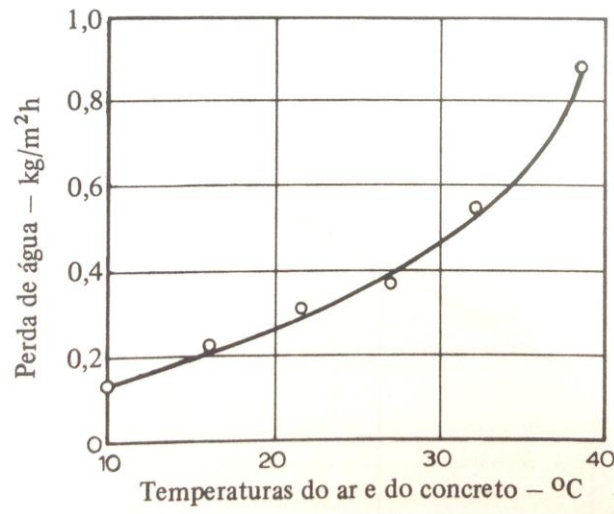
Figura 8 – Resistência do concreto curado a vapor a diferentes temperaturas (relação água/cimento = 0,55; cura aplicada imediatamente após a moldagem).



(fonte: NEVILLE, 2016, p. 383)

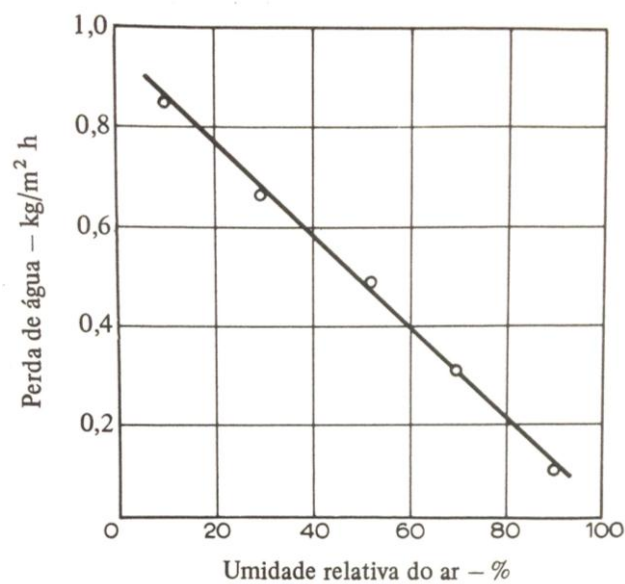
Relacionando a temperatura com a perda da água no sistema, a qual também gera uma perda de resistência, Neville (1997) mostra que quanto maior a temperatura do ar e do concreto, maiores são as perdas de água, conforme figura 9, e quanto maior a umidade relativa do ar, menor a perda de água do sistema, vide figura 10. O autor afirma que os exemplos são meramente típicos, pois a perda efetiva da água depende da relação entre a área e o volume da peça de concreto. Pode-se notar que para temperaturas mais elevadas tem-se um grande crescimento na resistência nas primeiras idades e posteriormente há um crescimento menor que os concretos curados a temperaturas mais baixas.

Figura 9 – Influência da temperatura do ar e do concreto sobre a perda de água do concreto nas primeiras idades (umidade relativa 70%; velocidade do vento 4,5 m/s)



(fonte: NEVILLE, 1997, p. 327)

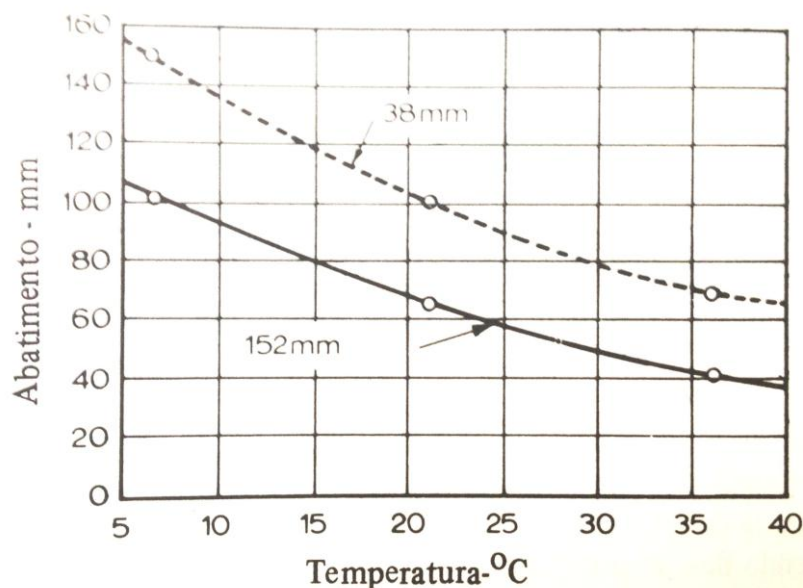
Figura 10 – Influência da umidade relativa do ar sobre a perda de água do concreto nas primeiras idades (temperatura do ar 21°C; velocidade do vento 4,5 m/s)



(fonte: NEVILLE, 1997, p. 327)

A trabalhabilidade de uma mistura também é influenciada pela temperatura, conforme figura 11, onde se pode notar a perda do abatimento com o aumento da temperatura.

Figura 11 – Influência da temperatura sobre a perda de abatimento de concretos com diversos tamanhos de agregados



(fonte: NEVILLE, 1997, p. 212)

Em concretos de alta resistência, ESCANDEILLAS et al.<sup>6</sup> (1999, apud BEZERRA, 2005, p. 43) afirmam que as perdas de resistências são estimadas em torno de 10%, para temperaturas de cura da ordem de 60°C, podendo atingir 30% para a temperatura máxima de 80°C.

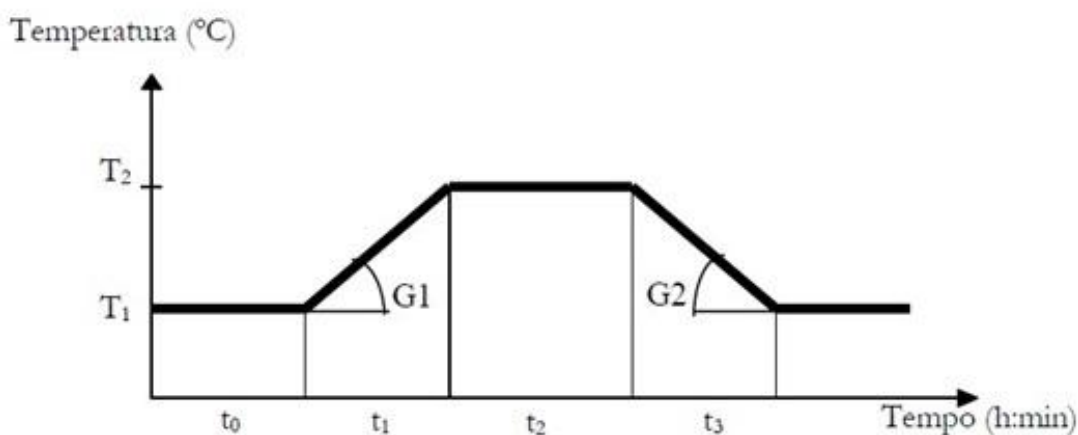
Camarini e Cincotto (1995) avaliaram dois tipos de argamassas, um traço com cimento Portland comum e outro com cimento Portland de alto forno, variando a temperatura de cura em 60°C, 80°C e 95°C expondo os corpos de prova a diferentes ciclos de tempo. Para a temperatura de 60°C, em apenas algumas horas obteve-se cerca de 51% da resistência alcançada aos 28 dias na cura normal, porém a idades mais avançadas houve perdas de 5% aos 28 dias e 22% aos 90 dias, comparando-se a cura normal.

O ciclo de cura térmica proposto por Camarini e Cincotto (1995) é tomado como base em diversos trabalhos científicos e é descrito segundo a figura 12. Utiliza-se esse ciclo de temperatura para que as peças não sejam danificadas com um aumento rápido e excessivo de temperatura. Na cura térmica as temperaturas não devem exceder 80°C para não causar modificações na microestrutura do concreto. Nesse ciclo, devem-se observar alguns períodos:

<sup>6</sup> ESCANDEILLAS, G.; MUNOZ, P.; PONS, G. Traitements thermiques des bétons – Que peut-on dire du comportement des bétons à hautes performances? Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 1999, p. 132-120, spécial XIX.

- a)  $T_1$ : temperatura ambiente em  $^{\circ}\text{C}$ ;
- b)  $T_2$ : temperatura máxima atingida no ciclo em  $^{\circ}\text{C}$ ;
- c)  $t_0$ : período de espera em h:min. Período decorrido entre a mistura do aglomerante com a água e o início do aquecimento;
- d)  $t_1$ : período de elevação da temperatura em h:min;
- e)  $t_2$ : período de manutenção da temperatura até que se atinja a resistência desejada;
- f)  $t_3$ : período de resfriamento em h:min;
- g)  $G_1$ : gradiente de aquecimento;
- h)  $G_2$ : gradiente de resfriamento.

Figura 12 – Ciclo de temperatura



(fonte: CAMARINI; CINCOTTO, 1995)

Coliante (2013) estudou a microestrutura e variação da resistência à compressão em argamassas produzidas com cimento Portland CPV ARI-RS curados a  $21^{\circ}\text{C}$  e  $60^{\circ}\text{C}$ . O autor apresenta uma perda de 19% de resistência no intervalo de 7 dias para 28 dias em cura térmica comparada à cura úmida. De acordo com o autor essa diminuição, nos corpos de prova curados termicamente, está associada à formação de planos de clivagem que ocorrem paralelos ao C-H, em função da expansão do tamanho dos produtos formados. Na cura úmida, os valores de resistência mecânica se desenvolveram de forma crescente.

Os dados obtidos por Bardella et al. (2006) resultaram na resistência à compressão em cura térmica maior que em cura ao ar. Isso é mais significativo nas primeiras horas e nas idades iniciais. Nas idades avançadas houve crescimento de resistência para ambos os tipos de cura e, particularmente na cura térmica não ocorreu perda de resistência em comparação a

concretos curados ao ar, fato que normalmente é percebido conforme citado em outros trabalhos. Os dados citados foram fruto do estudo em concretos com cimento Portland de alto forno CPIII e a temperatura de cura térmica igual a 60°C.

Bardella et al. (2005) estudaram concretos submetidos a dois tipos de cura: ao ar e a 80°C. Os corpos de prova foram moldados com cimento Portland de alto forno CP III com e sem sílica ativa e foram realizados ensaios de compressão axial em 1, 3, 7, 28, 90 e 180 dias. A cura foi dada apenas no ciclo inicial. O concreto submetido à cura de 80°C sem sílica ativa apresentou um ganho de resistência à compressão significativo com 1 dia de idade, apresentando resistência acima do obtido com cura ao ar. Nas idades avançadas (acima de 28 dias) o pior desempenho foi obtido pelo concreto curado a 80°C, apresentando resistência 4,7% menor que a cura ao ar na idade de 180 dias. Para os concretos com sílica ativa, as resistências dos corpos de prova submetidos à cura térmica foram menores que os curados ao ar a partir da idade de 28 dias.

Martins (2001) avaliou que a partir dos 7 dias, a cura térmica (60°C) mostrou resistência à compressão sempre menor que a do concreto curado por imersão (mergulhado em água até 7 dias e após curado a temperatura ambiente de 25°C). O autor estudou concretos com cimento de alta resistência inicial.

Ferreira Junior (2003) utilizou concretos com dois tipos de cimento (CP-III e CP V-ARI) submetidos a quatro tipos de cura: normal (25°C), imerso em água por 7 dias, ao ar e térmica (60°C e 80°C). Os resultados obtidos mostraram que a cura térmica não contribuiu significativamente para a elevação da resistência nas primeiras idades para os concretos produzidos com CP V-ARI, mas melhora muito a resistência dos concretos produzidos com CP-III, principalmente na temperatura de 80°C.

Dos Anjos et al. (2004) estudaram temperaturas de cura de 8°C , 30°C e 50°C em concretos refratários de alta alumina e com baixo teor de cimento. Para temperaturas mais baixas afirma que apesar da redução da temperatura atenuar a reação do cimento, os hidratos gerados são menos densos que aqueles formados em alta temperatura. Em baixas temperaturas também é formada a alumina gel, um composto que possui elevada eficiência no preenchimento dos espaços disponíveis, gerando uma estrutura menos permeável, que ao longo do tempo irá melhorar a resistência à compressão.

Bardella (2005) estudou três diferentes tipos de cura: cura por imersão em água até 7 dias, cura ambiente e cura térmica 60°C (pelo período de 4 horas). Os concretos foram confeccionados com CPV-ARI e CP-III com e sem sílica ativa. Com 1 dia de idade a cura térmica teve mais resistência que os outros tipos de cura, porém a partir da idade de 7 dias, os concretos submetidos a cura térmica apresentaram resistências menores que os concretos submetidos aos demais tipos de cura, conforme visto em outros estudos.

Os estudos de Salum (2016) mostram que, aos 28 dias, os concretos curados termicamente apresentaram resistência à compressão superior aos concretos mantidos a temperatura ambiente. O autor explica que isso ocorre, pois à temperatura elevada, ao acelerar as reações de hidratação do cimento Portland e a reação pozolânica, se estabelece um maior grau de hidratação dos materiais cimentícios. Dentre os tipos de cura com elevação de temperatura, os melhores desempenhos mecânicos foram observados nos concretos curados com picos de temperatura inferiores (entre 45 e 55°C), no qual as reações ocorrem sob temperatura intermediária (permitindo que haja uma melhor distribuição do gel de cimento), que no regime com picos entre 58 e 73°C.

Turuлло e Soutsos<sup>7</sup> (2015, apud SALUM, 2016) estudaram concretos curados sob temperaturas constantes de 20°C, 30°C, 40°C e 50°C, durante 28 dias. Nas primeiras idades observaram que os concretos curados a temperaturas mais elevadas apresentaram resistência superior aos demais. Já em idades mais avançadas, concretos com menores temperaturas de cura apresentaram maiores resistências.

Pereira (2001) estudou concretos confeccionados com dois tipos de cimento (CP-II-F e CP-IV) curados termicamente a 5, 15, 25, 30 e 40°C e observou que o aumento da resistência à compressão do concreto foi proporcional ao aumento da temperatura de cura. O autor afirma que isto ocorreu devido à aceleração das reações de hidratação causada pelas temperaturas mais elevadas, ocasionando uma estrutura mais densa. Como as reações de hidratação dos compostos de cimento Portland são lentas, é necessário manter níveis adequados de temperatura para proporcionar a energia de ativação necessária para as reações e, conseqüentemente, o desenvolvimento da resistência, já que o mesmo está associada ao preenchimento dos vazios com os produtos de hidratação.

---

<sup>7</sup> TURUALLLO, G.; SOUTSOS, M.N. Supplementary cementitious materials: Strength development of self-compacting concrete under diferente curing temperature. In: 5TH International conference of Euro Asia Civil Engineering Forum, p.699 – 704, 2015.



Silva (1998) estudou a influência do calor de hidratação e da resistência à compressão variando a temperatura de cura em concretos com cimento de alto forno. O autor afirma que, o valor do grau de hidratação é alcançado em um tempo 10 vezes menor a 60°C do que a 20°C, e 26 vezes menor a 80°C do que a 20°C. Sobre a resistência à compressão em concretos curados com temperaturas mais elevadas o autor afirma que a provável formação de material hidratado ao redor dos grãos anidros inibe o prosseguimento da hidratação e afeta negativamente a resistência à compressão nas idades mais avançadas

#### 3.3.4.1 Concretagem em clima quente

Mehta e Monteiro (1994) apontam como clima quente qualquer combinação de altas temperaturas, baixa umidade relativa do ar e velocidade do vento, tendendo a prejudicar as propriedades tanto do concreto fresco quanto endurecido. As propriedades mais afetadas são a perda de abatimento, o aumento da retração plástica e a redução do tempo de pega.

Neville (1997, p. 401) explica que existem alguns problemas especiais na concretagem em clima quente que devem se tomar cuidados, como a temperatura elevada do concreto e a maior velocidade de evaporação da água. A evaporação rápida pode causar fissuração plástica e fissuração generalizada, prejudicando a qualidade e a durabilidade desse concreto. Os problemas causados pelas altas temperaturas devem ser atentados tanto na mistura do concreto, quanto no seu lançamento e sua cura. Segundo o autor, existe uma série de medidas preventivas que podem ser tomadas para amenizar os problemas causados pelas altas temperaturas, entre elas:

[...] o teor de cimento deve ser o mais baixo possível de modo que o calor de hidratação não venha a agravar os efeitos da temperatura ambiente elevada. A temperatura do concreto fresco pode ser abaixada com o resfriamento prévio de um ou mais ingredientes da mistura. Seria desejável uma temperatura de 10°C, mas isso pode ser impraticável.

#### 3.3.4.2 Concretagem em clima frio

De acordo com Neville (1997) o termo tempo frio é definido por duas condições. A primeira quando a média das temperaturas máxima e mínimas em três dias consecutivos for menor que 5°C, a segunda quando a temperatura do ar durante pelo menos 12h, em qualquer período de 24 horas, for 10°C ou menor. Segundo Mehta e Monteiro (1994), em climas frios, as

concretagens são permitidas em peças com grandes seções e volumes, sem preocupação, pois o calor de hidratação gerado dissipa-se mais lentamente do que em peças com menores volumes e grandes áreas expostas.

Neville (1997, p. 403), expõe uma preocupação para temperaturas muito baixas, de aproximadamente  $-10^{\circ}\text{C}$ , onde as reações podem ocorrer lentamente ou não ocorrer. O autor aborda o efeito do congelamento da água sobre o concreto e afirma:

Se o concreto que ainda não teve início de pega se congelar, o efeito do congelamento é semelhante ao que ocorre com um solo saturado sujeito a inchamento: a água de amassamento se congela com aumento do volume do concreto. Além disso, como não existe água disponível para as reações químicas, a pega e o endurecimento do concreto são retardados. Segue desta última observação que, se o concreto se congelar imediatamente após lançado, não haverá pega nem na pasta de cimento, que será desagregada pela formação de gelo. Enquanto a temperatura permanecer baixa, o processo de hidratação fica suspenso. Quando, mais tarde, ocorre o degelo, o concreto deveria ser revibrado, havendo depois pega e endurecimento sem prejuízo de resistência. No entanto, devido à dilatação da água de mistura durante o congelamento, a falta de revibração resultaria a pega do concreto com grande quantidade de poros, e, em consequência, a resistência seria baixa.

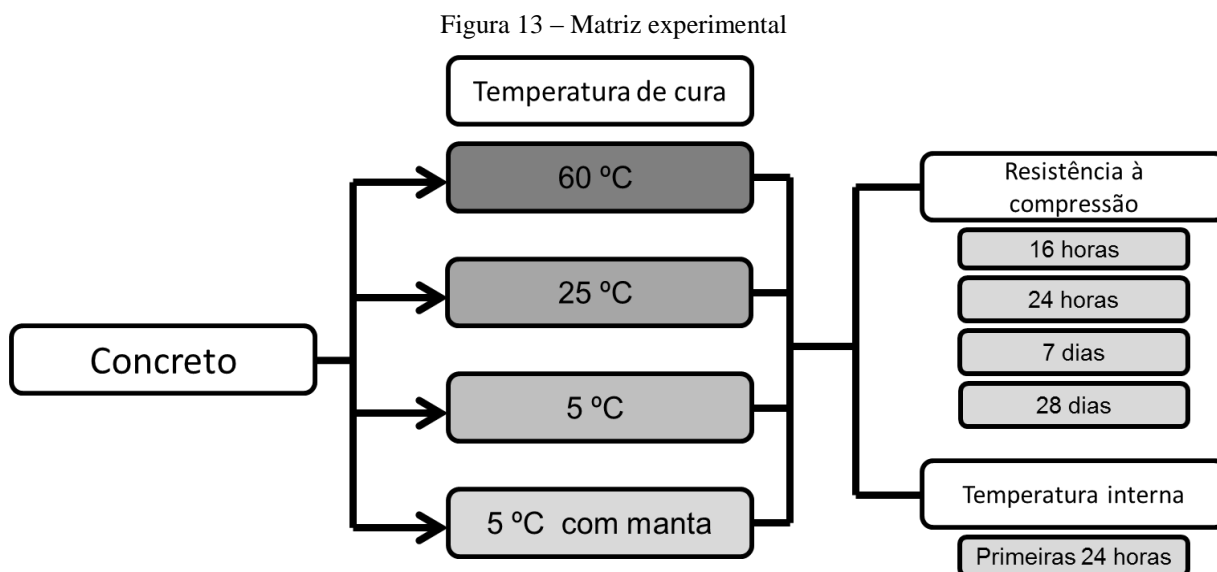
Neville (1997) cita algumas maneiras de se aumentar a temperatura do concreto nessas situações, como usar cimentos de alta resistência inicial com composições mais ricas, para ter maior calor de hidratação na mistura, aquecer a água de amassamento e/ou os agregados da mistura.

## 4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentada a metodologia adotada neste estudo, a caracterização dos materiais utilizados e a descrição dos ensaios realizados no laboratório NORIE/LAMTAC na Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

### 4.1 METODOLOGIA

A metodologia proposta para esse trabalho, para verificar a influência da temperatura de cura sobre a resistência à compressão de um determinado traço de concreto, foi baseada na prática adotada por uma empresa construtora em uma obra de grande porte na região metropolitana de Porto Alegre. A matriz experimental do trabalho é apresentada na figura 13.



(fonte: elaborado pelo autor)

Foram adotadas três temperaturas de cura para o mesmo traço de concreto. A temperatura de 25°C foi definida como temperatura média, usualmente medida em Porto Alegre. A temperatura mais elevada foi adotada como 60°C, comumente encontrada em outras indústrias de peças pré-moldadas. A temperatura baixa foi definida como 5°C, usualmente medida no inverno na região sul do país. Para essa temperatura foi acrescida a variável manta

térmica, como forma de reduzir o impacto negativo das baixas temperaturas nas resistências iniciais do concreto. Essa manta térmica é utilizada apenas em temperaturas baixas a fim de se manter o calor de hidratação.

As idades para a realização dos ensaios de resistência à compressão foram definidas com base em informações fornecidas pela empresa. A mesma realizava a desmoldagem de peças pré-moldadas com idade de 24 horas e necessitava diminuir esse tempo para 16 horas. Além das idades iniciais foram feitas rupturas aos 7 e 28 dias para comparativo do crescimento da resistência. Para cada intervalo de ruptura foram moldados três corpos de prova cilíndricos, de acordo com NBR 5739 (ABNT, 2007), totalizando 48 corpos de prova.

Como o desenvolvimento do calor de hidratação está diretamente ligado à resistência do concreto, definiu-se medir a temperatura interna dos corpos de prova nas primeiras 24 horas.

O concreto estudado foi definido com resistência característica de 40 MPa. Para tanto usou-se a relação água/cimento igual a 0,41. O abatimento foi fixado em 200 mm  $\pm$  30 mm. O proporcionamento dos materiais pode ser visualizado na tabela 2.

Tabela 2 – Proporcionamento dos materiais, traço unitário em massa

<b>Material</b>	Cimento	Areia	Brita 0	Brita 1	Água	Aditivo 1	Aditivo 2
<b>Proporcionamento</b>	1	1,5	1,17	1,17	0,41	0,60%	0,240%

(fonte: elaborado pelo autor)

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Neste item são apresentados os materiais utilizados e os ensaios adotados para sua caracterização. Conforme explicitado anteriormente, estudou-se apenas um traço de concreto, adotado na execução de uma obra na região metropolitana de Porto Alegre. A construtora forneceu todos os materiais necessários para realização do trabalho.

### 4.2.1 Cimento

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland CP-IV 32. A massa específica do cimento foi determinada em laboratório, conforme a NBR NM 23 (ABNT, 2001) e resultou no valor de 2,59 g/cm<sup>3</sup>.

### 4.2.2 Agregados

Os agregados utilizados no concreto foram brita basáltica tipo 0, brita basáltica tipo 1 e areia média quartzosa. Na mistura todos os agregados encontravam-se no estado seco.

#### 4.2.2.1 Agregado miúdo

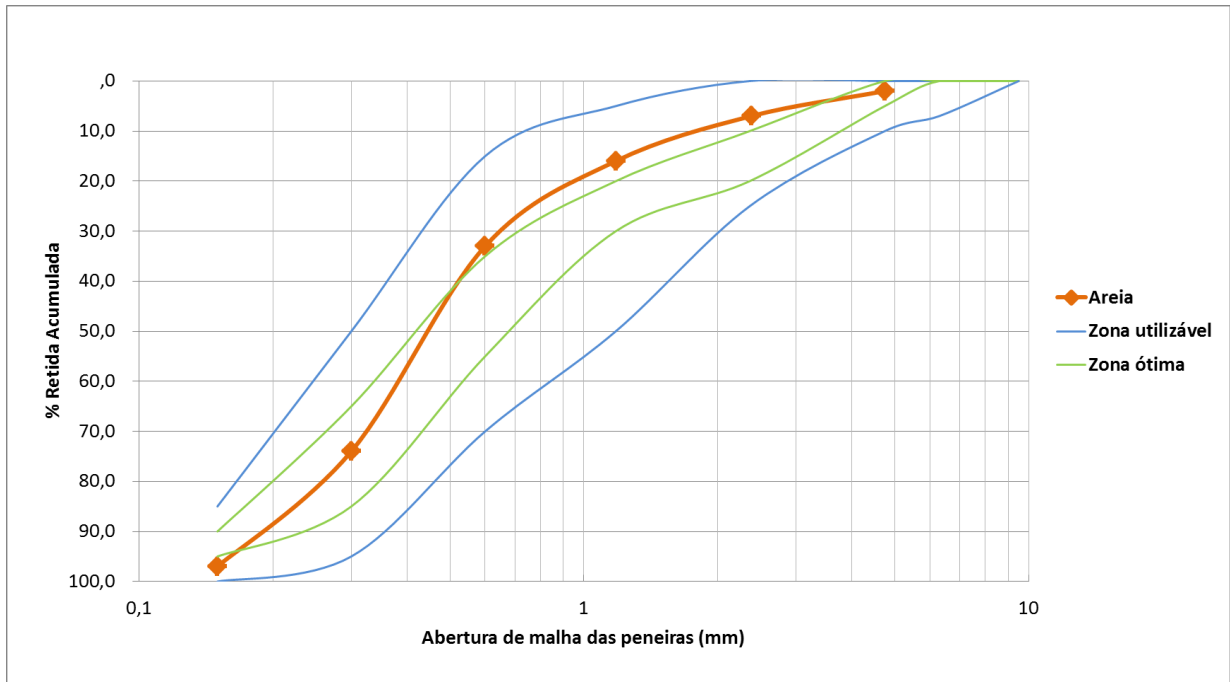
O ensaio de massa específica do agregado miúdo foi executado seguindo os procedimentos da NBR NM 52 (ABNT, 2009) obtendo-se 2,58 g/cm<sup>3</sup>. A distribuição granulométrica e o módulo de finura podem ser vistos na tabela 3. Os ensaios foram executados de acordo com as recomendações da NBR NM 248 (ABNT, 2003b).

Tabela 3 – Distribuição granulométrica, módulo de finura e diâmetro máximo do agregado miúdo

Peneira (mm)	Massa retida Individual (g)	Porcentagem Retida	
		Individual	Acumulada
4,75	22,72	2	2
2,36	46,63	5	7
1,18	89,88	9	16
0,6	165,52	17	33
0,3	404,43	41	74
0,15	234,65	23	97
Fundo	33,18	3	100
<b>Total</b>	<b>997,01</b>	<b>100,0</b>	
<b>Módulo de finura</b>	<b>2,29</b>		
<b>Diâmetro máximo</b>	<b>4,75 mm</b>		

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 14 – Curva granulométrica do agregado miúdo



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.2.2.2 Agregado graúdo

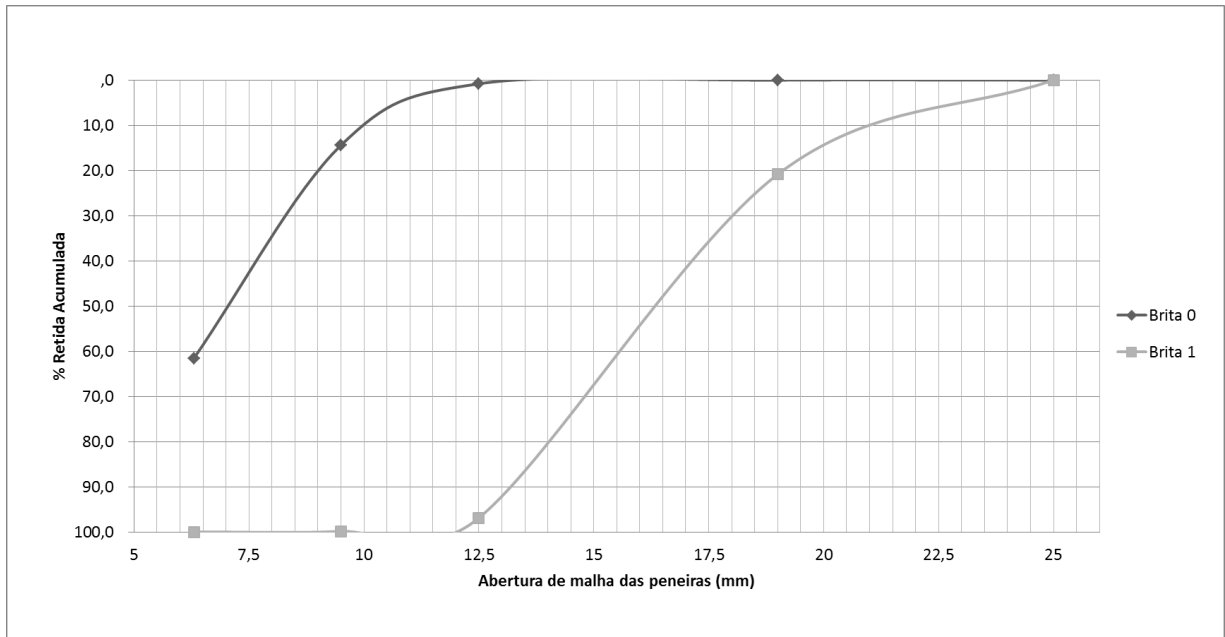
Na tabela 4 é apresentada a distribuição granulométrica do agregado graúdo, determinada conforme procedimentos da NBR NM 248 (ABNT, 2003b), a massa específica, determinada segundo NBR NM 53 (ANBT, 2009), o diâmetro máximo, a absorção de água e o módulo de finura. Na figura 15 é apresentada a curva granulométrica.

Tabela 4 – Características físicas dos agregados graúdos

Peneira (mm)	Brita 0			Brita 1		
	Massa retida Individual (g)	Percentagem Retida		Massa retida Individual (g)	Percentagem Retida	
		Individual	Acumulada		Individual	Acumulada
25	0,0	0	0	0,0	0	0
19	0,0	0	0	1042,0	21	21
12,5	16,0	1	1	3800,6	76	97
9,5	272,2	14	15	148,0	3	100
6,3	943,1	47	62	6,9	0	100
Fundo	768,1	38	100	0,0	0	100
<b>Módulo de finura</b>	<b>6,15</b>			<b>7,21</b>		
<b>Massa específica</b>	<b>2,95 g/cm<sup>3</sup></b>			<b>2,91 g/cm<sup>3</sup></b>		
<b>Diâmetro máximo</b>	<b>12,50 mm</b>			<b>25,00 mm</b>		
<b>Absorção de água</b>	<b>1,43%</b>			<b>0,66%</b>		

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 15 – Curva granulométrica dos agregados graúdos



(fonte: elaborado pelo autor)

### 4.2.3 Aditivos

Foram utilizados dois aditivos na mistura do concreto. O aditivo 1, que de acordo com o fabricante, “[...] é de uma linha de aditivos polifuncional para concreto com bom poder de redução de água, com aplicações múltiplas e isento de cloretos” e aditivo 2 que “[...] é de uma linha de aditivos superplastificantes para concreto com alto poder de redução de água e com aplicações múltiplas e isento de cloretos”. Algumas características são apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 – Características dos aditivos descritas pelo fabricante

Produto	Descrição do produto	Aspecto/Cor	Dosagem recomendada (% SPC)	Massa Específica g/cm <sup>3</sup> (NBR 10908)
<b>Aditivo 1</b>	Dispersante de alta eficácia que resulta em notável melhoria de resistência à compressão inicial e final. Prolongada manutenção do abatimento do concreto, mantendo um tempo de pega controlado	Líquido marrom escuro	0,6 a 1,0%	1,110 - 1,170
<b>Aditivo 2</b>	Concreto em geral, fluido ou auto adensável. Proporciona excelente redução da demanda de água, boa manutenção de abatimento e ótimas resistências iniciais e finais.	Líquido alaranjado	0,3 a 1,2%	1,075 - 1,115

(fonte: fabricante)

#### 4.2.4 Água

Utilizou-se água proveniente da rede de abastecimento do DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto – em Porto Alegre.

#### 4.2.5 Manta térmica

A manta térmica estudada foi a mesma utilizada pela construtora em dias de concretagem com temperaturas muito baixas. Para o estudo em laboratório, a mesma foi cortada e costurada na forma de pequenos sacos (figura 16), de forma que fosse possível armazenar um corpo de prova (figura 17). O fabricante define a manta como uma:

“Cobertura destinada a isolar termicamente áreas de concretagem, impedindo a dissipação do calor gerado pela reação exotérmica durante o processo de cristalização do concreto, acelerando o processo de cura deste. Produzida com as camadas externas em tecido impermeável Nylon Emborrachado (face interna em tecido tramado de poliamida e externa em PVC), e internamente com camada de polietileno expandido dublado em ambas as faces com lâminas de material aluminizado” (fabricante).

Figura 16 – Sacos confeccionados com a manta térmica



(fonte: foto do autor)

Figura 17 – Corpo de prova envolvido pela manta térmica



(fonte: foto do autor)



### 4.3 METODOLOGIA DE ENSAIOS

A seguir são apresentados os métodos de ensaios, incluindo moldagem dos corpos de prova, cura térmica, resistência à compressão e medição da temperatura interna do concreto.

#### 4.3.1 Moldagem dos corpos de prova

A sequência adotada na mistura dos materiais, para produção do concreto, foi inicialmente toda brita 0 e toda brita 1, seguido por parte da água, cimento, aditivo 1, areia, aditivo 2 e água. Utilizou-se uma betoneira de eixo vertical e formas metálicas cilíndricas de 9,5 cm x 19 cm. Os corpos de prova foram moldados seguindo a NBR 5738 (ABNT, 2015).

Foram realizadas três concretagens. Na primeira, moldaram-se os corpos de prova que foram curados em 5°C e 25°C; na segunda os de 5°C a serem embalados com manta e 60°C e na terceira os corpos de prova para medição da temperatura interna. Os dados das concretagens podem ser visualizados na tabela 6.

Tabela 6 – Dados das concretagens

<b>Concretagem 1 - 5°C e 25°C</b>	
Abatimento	220 mm
Temperatura Ambiente	25,9 °C
Umidade Relativa	76,80%
<b>Concretagem 2 - 5°C com manta e 60°C</b>	
Abatimento	210 mm
Temperatura Ambiente	24,3 °C
Umidade Relativa	79,30%
<b>Concretagem 3 - Temperatura Interna</b>	
Abatimento	220 mm
Temperatura Ambiente	24,4 °C
Umidade Relativa	83,00%

(fonte: elaborado do autor)

Nas duas primeiras concretagens dimensionou-se os materiais para moldagem de 24 corpos de prova, obtendo-se abatimento de 220 mm e 210 mm respectivamente. O ensaio de abatimento (figura 18) seguiu os procedimentos da NBR NM 67 (ABNT, 1998).

Figura 18 – Ensaio de abatimento do concreto



(fonte: foto do autor)

Na terceira concretagem, a quantidade de material foi dividida pela metade, pois eram necessários apenas quatro corpos de prova para medição da temperatura interna. O resultado do abatimento não ficou dentro do padrão estipulado de  $200 \text{ mm} \pm 30 \text{ mm}$ . Com isso fez-se a correção com a adição de mais 27,05 gramas do aditivo 2, chegando-se a um abatimento de 220 mm, sem alteração da relação água/cimento. Acredita-se que a energia de mistura possa ter influenciado no abatimento do concreto por termos metade do material em comparação com as duas primeiras concretagens.

### 4.3.2 Cura

Todas as curas térmicas foram realizadas dentro de banhos térmicos. Como o concreto foi moldado e já disposto nas diferentes curas, ainda no estado fresco, foi necessário envolver cada corpo de prova em três sacos plásticos, de forma a fechá-lo hermeticamente, prendendo-os com uma fita e uma abraçadeira de plástico (figura 19), a fim de não se ter o contato da água de cura com o concreto fresco. Após a desmoldagem dos corpos de prova os sacos eram removidos. Na obra as curas foram feitas ao ar livre, não sendo possível realizar a cura térmica devido a grande dimensão das peças pré moldadas que eram estacas com cerca de 1 m de diâmetro.

Figura 19 – Aspecto visual do corpo de prova preparado para receber o processo de cura



(fonte: foto do autor)

Para a realização das curas em diferentes temperaturas utilizou-se dois banhos térmicos: um para cura a  $T=25^{\circ}\text{C}$  (figura 20) e um para  $T= 60^{\circ}\text{C}$  (figura 21); como ambiente de cura a  $5^{\circ}\text{C}$ , utilizou-se uma geladeira colocando-se os corpos de prova dentro de caixas plásticas cheias d'água (figura 22).

Figura 20 – Corpos de prova armazenados em banhos térmicos com temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  após a desmoldagem e retirada dos sacos plásticos



(fonte: foto do autor)

Figura 21 – Corpos de prova envoltos e fechados em sacos plásticos posicionados em banho térmico com temperatura controlada =  $60^{\circ}\text{C}$



(fonte: foto do autor)

Figura 22 – Corpos de prova envoltos e fechados em sacos plásticos posicionados em caixas plásticas no interior da geladeira com temperatura controlada = 5°C



(fonte: foto do autor)

Todos os corpos de prova foram desmoldados com 16 horas (idade do primeiro ensaio de resistência à compressão), exceto os que foram submetidos à cura de 5°C e 5°C envoltos com manta térmica, os quais não puderam ser desmoldados devido à baixa resistência, sendo desmoldados posteriormente com 24h.

### 4.3.3 Temperatura interna do concreto

A medição da temperatura interna dos corpos de prova foi realizada com o auxílio de um Field Logger da marca Novus (figura 23) e termopares do tipo K MTK-01 (figura 24).

De acordo com o fabricante, o Field Logger “[...] é um equipamento de aquisição e registro de variáveis analógicas. Opera como um Registrador Eletrônico de dados, armazenando as informações adquiridas em sua memória interna para análise posterior” (NOVUS). Para os termopares do tipo K a precisão do equipamento é de 0,2% da faixa máxima,  $\pm 1^\circ\text{C}$ . A configuração das medições é feita através de um software de fácil operação (figura 25).

Figura 23 – Aparelho para medição e registro das temperaturas (Field Logger)



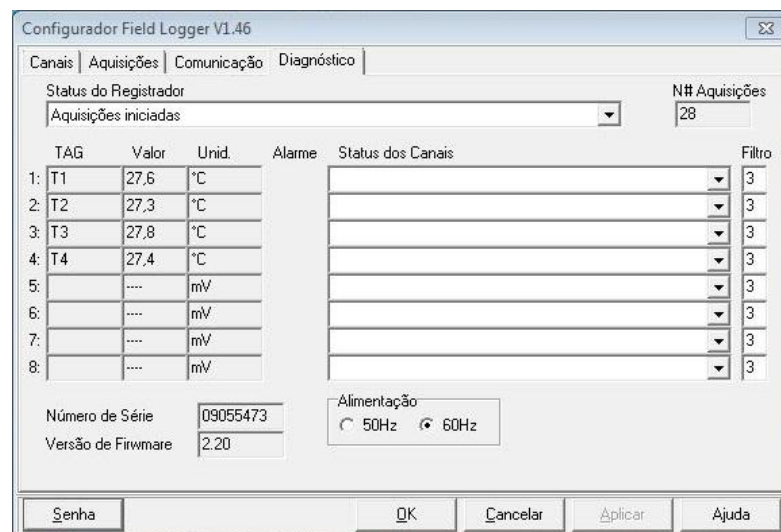
(fonte: foto do autor)

Figura 24 – Termopar tipo K



(fonte: foto do autor)

Figura 25 – Interface do Software Field Logger



(fonte: foto do autor)

As moldagens dos corpos de prova foram feitas em duas camadas e adensadas com batidas na lateral do molde metálico com o auxílio de um martelo de borracha. Após isso, se abria um caminho no centro do corpo de prova com o auxílio de uma chave de fenda para que fosse possível inserir o termopar 10 cm abaixo do topo da forma. Quando finalizadas as moldagens dos quatro corpos de prova, com seus termopares posicionados, os mesmos foram colocados

nos banhos, iniciando-se o processo de leitura das temperaturas. Para esse procedimento, utilizou-se o mesmo processo de introdução dos moldes dos corpos de prova dentro dos sacos plásticos para não se ter o contato direto com a água de cura, como citado anteriormente. Nas figuras 26 e 27 pode-se ver o corpo de prova com o termopar posicionado.

Figura 26 – Corpo de prova com termopar posicionado



(fonte: foto do autor)

Figura 27 – Corpo de prova com manta e termopar posicionado



(fonte: foto do autor)

Através do software do aparelho, as medições foram configuradas para um período de 24h com intervalo de 20 segundos entre cada registro. As medições de temperatura foram realizadas ao mesmo tempo (figura 28), com 4 termopares ligados no Field Logger e colocados em cada corpo de prova submetido a um dos quatro tipos de cura definidos no trabalho.

Figura 28 – Ensaio da medição da temperatura interna



(fonte: foto do autor)

#### 4.3.4 Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados em uma prensa da marca EMIC, com capacidade de 2000KN e velocidade de carga de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007).

A avaliação da resistência à compressão foi determinada através da ruptura de três corpos de prova para cada variável de estudo. Após permanecerem o período estipulado nos diferentes ambientes de cura a diferentes temperaturas, os corpos de prova eram retirados dos banhos 2 horas antes da ruptura e retificados com o auxílio de uma retífica de eixo vertical. Com o auxílio de um paquímetro digital foram feitas medições de cada corpo de prova para posterior cálculo da resistência à compressão de acordo com suas dimensões.

A NBR 5739 (ABNT, 2007) recomenda que se meçam os corpos de prova e se faça a correção da carga obtida no ensaio de resistência à compressão, a qual indica a multiplicação da força de ruptura por um fator de correção, obtido de acordo com a relação entre a altura (h) e o diâmetro (d) de cada corpo de prova. As dimensões dos corpos de prova e os fatores calculados encontram-se no apêndice A. Na tabela 7, estão apresentados os fatores de correção, os quais devem ser interpolados linearmente se a relação entre altura e diâmetro for diferente das indicadas.

Tabela 7 – Fator de correção da carga de ruptura

<b>NBR 5739/2007</b>					
Relação h/d	2	1,75	1,5	1,25	1
Fator de correção	1	0,98	0,96	0,93	0,87

(fonte: ABNT, 2007)



## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e as análises dos mesmos de acordo com os dados coletados nos ensaios.

### 5.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os dados do ensaio de resistência média à compressão obtidos são apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Resistência média à compressão e desvio padrão, ao longo do tempo

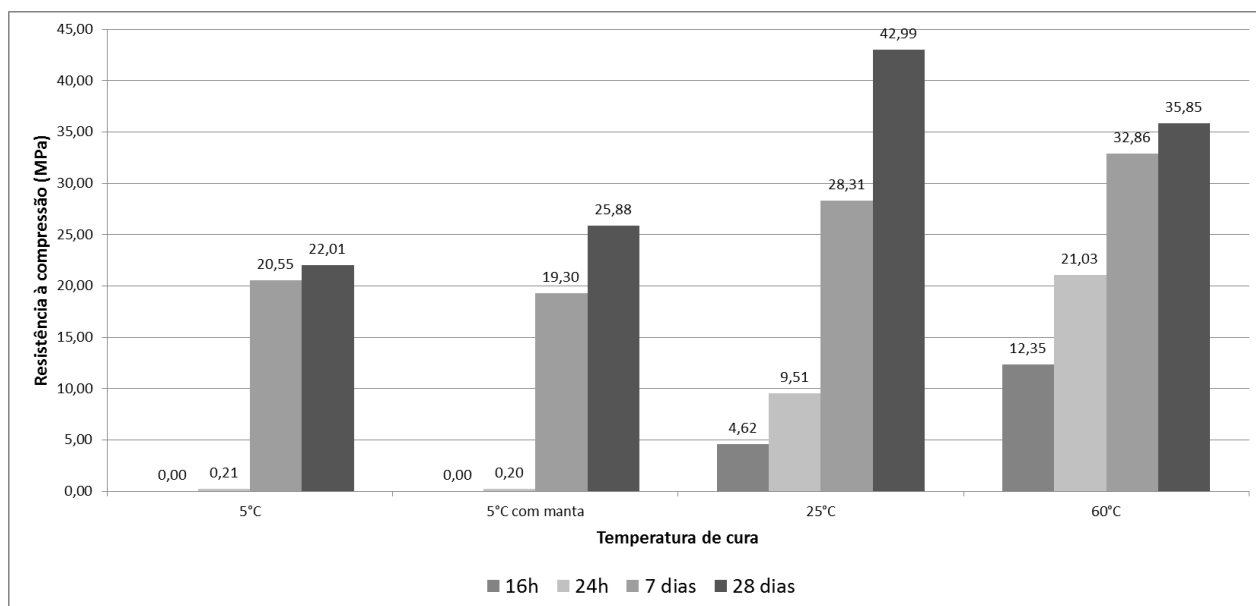
Temperatura de cura	Idade	Resistência média à compressão (MPa)	Desvio Padrão
5°C	16h	0,00	0,00
	24h	0,21	0,02
	7 dias	20,55	1,60
	28 dias	22,01	2,81
5°C com manta	16h	0,00	0,00
	24h	0,20	0,03
	7 dias	19,30	0,45
	28 dias	25,88	1,04
25°C	16h	4,62	0,41
	24h	9,51	0,93
	7 dias	28,31	2,57
	28 dias	42,99	2,28
60°C	16h	12,35	0,69
	24h	21,03	2,42
	7 dias	32,86	0,33
	28 dias	35,85	3,16

(fonte: elaborado pelo autor)

Pra um melhor entendimento, os dados foram plotados em gráficos que são apresentados a seguir vide figura 29 e 30.

Conforme Figura 29, há um acréscimo de resistência à compressão ao longo do tempo, como era de se esperar. Verifica-se também uma tendência de menores resistências para temperaturas mais baixas.

Figura 29 – Influência da temperatura de cura na resistência à compressão do concreto ao longo do tempo



(fonte: elaborado pelo autor)

Para a temperatura de 5°C, a resistência à compressão foi nula para a idade de 16h e se manteve até 24h. A partir deste ponto adquiriu resistência, porém manteve-se em patamares inferiores ao esperado (resistência em temperatura de cura de 25°C). Aos 7 dias de idade atingiu aproximadamente 50% da resistência esperada. Este comportamento também foi mantido até os 28 dias, quando atingiu uma resistência de 22 MPa, e não os 40 MPa esperados.

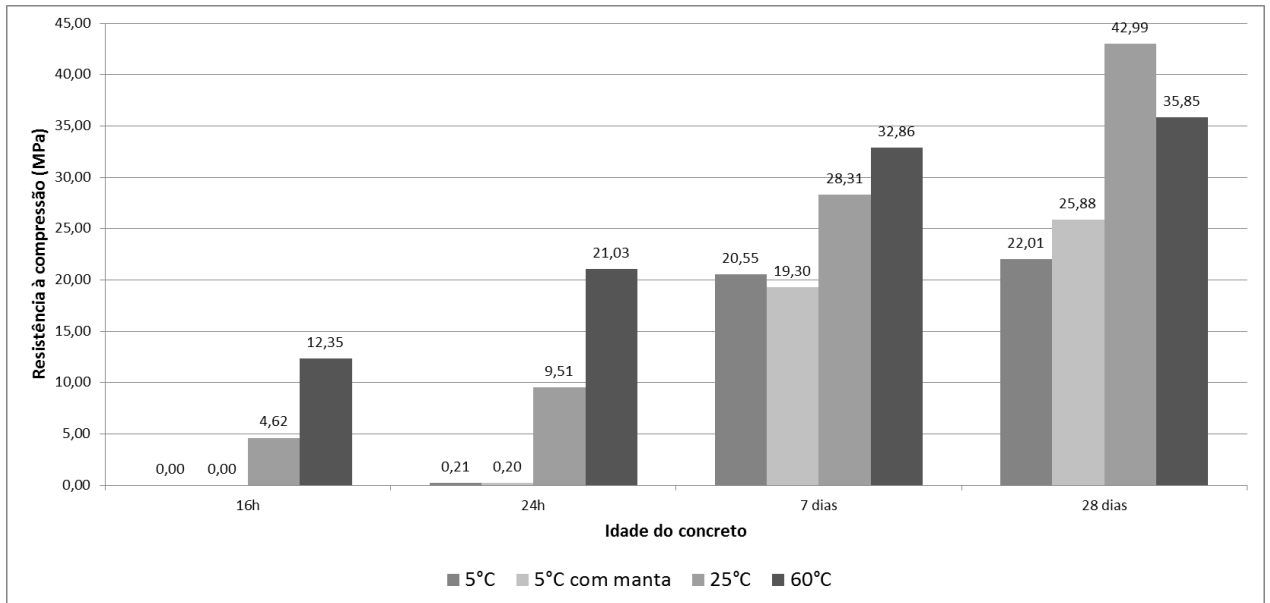
Ao analisar a influência da manta térmica verifica-se que esta não foi eficiente e apresentou resultados muito semelhantes aos dos corpos de prova sem a manta.

Para a temperatura de 60°C nota-se um grande crescimento nas primeiras idades, porém uma resistência final aos 28 dias menor que a temperatura intermediária. Este mesmo comportamento pode ser visto no estudo realizado por De Melo (2000), o qual analisou a microestrutura do concreto concluindo que as altas temperaturas produzem o enfraquecimento da interface pasta agregado reduzindo o desempenho mecânico a idades mais avançadas.

A mesma tendência de menores resistências à compressão em idades mais avançadas para temperaturas de cura mais elevadas também foi identificada por Mehta e Monteiro (1994), Camarini e Cincotto (1995), Silva (1998), Martins (2001), Bardella et al. (2005), Bardella (2005) e Coliante (2013).

A figura 30 mostra as diferenças de resistência à compressão para cada temperatura a diferentes idades. Como se pode notar com idade de 16h a resistência é nula para as temperaturas mais baixas de 5°C e 5°C com manta e há um grande aumento de resistência para 60°C.

Figura 30 – Resistência à compressão ao longo da idade



(fonte: elaborado pelo autor)

Aos 7 dias, as temperaturas baixas mantêm resistência praticamente iguais enquanto a diferença de 25°C para 60°C diminui.

Verifica-se que nas primeiras idades a manta térmica não ajudou no crescimento da resistência da temperatura entre as variáveis 5°C e 5°C com manta, porém aos 28 dias nota-se um pequeno aumento de resistência por conta do uso da manta térmica.

Aos 28 dias, para 25°C, houve um grande aumento de resistência, até mesmo ultrapassando a resistência da temperatura de 60°C. Isso fica evidenciado na figura 5, onde Neville (1997) explica que, com uma hidratação inicial rápida a temperaturas altas as hidratações subsequentes acabam sendo retardadas e produzem uma distribuição não uniforme dos produtos de hidratação no interior da pasta, prejudicando a resistência ao longo do tempo. Como a hidratação inicial é mais rápida, não há tempo para a difusão dos produtos para posições mais distantes das partículas de cimento, formando-se cristais maiores em grandes quantidades nas vizinhanças das partículas de cimento que posteriormente não conseguem

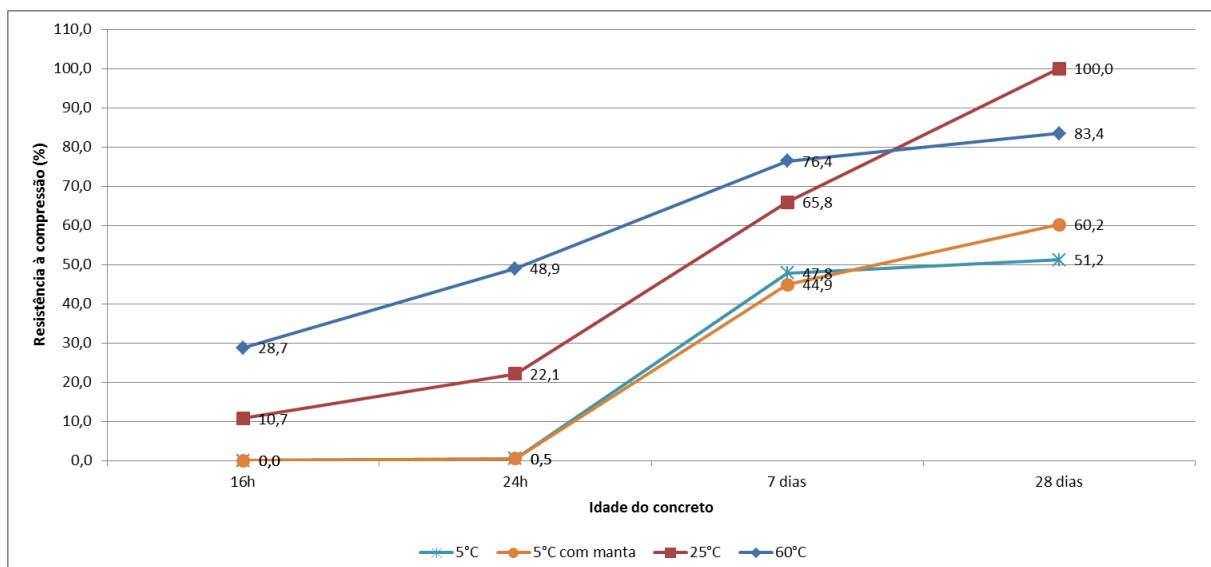
preencher os espaços intersticiais, aumentando-se o número de poros na matriz e diminuindo sua resistência.

Na figura 31 é apresentada a percentagem de resistência à compressão considerando-se a resistência da temperatura intermediária (25°C) aos 28 dias como 100%.

Nota-se que a temperatura de 60°C teve uma percentagem bem acima das outras temperaturas nas primeiras idades, porém aos 28 dias atingiu apenas 83,4% da resistência esperada. Os corpos de prova curados a temperatura de cura de 5°C atingiram pouco mais que a metade da resistência que se esperava, aos 28 dias. Já os corpos de prova envoltos com a manta térmica alcançaram 60,2% da resistência final esperada.

Comparando-se as temperaturas mais baixas nota-se que os corpos de prova com manta térmica, aos 28 dias, tiveram aproximadamente 10% a mais de resistência. Acredita-se que esse ganho de resistência possa ter se dado pelo fato de que os corpos de prova com a manta térmica demoraram 2 horas a mais que os corpos de prova sem a manta para se estabilizarem na temperatura de 6°C, como explicado no item 5.2.

Figura 31 – Percentagem da resistência à compressão ao longo do tempo considerando 100% a resistência de 25°C aos 28 dias



(fonte: elaborado pelo autor)

Na figura 32 são apresentadas as percentagens das resistências à compressão arbitrando-se como 100% o resultado de resistência de cada temperatura aos 28 dias.

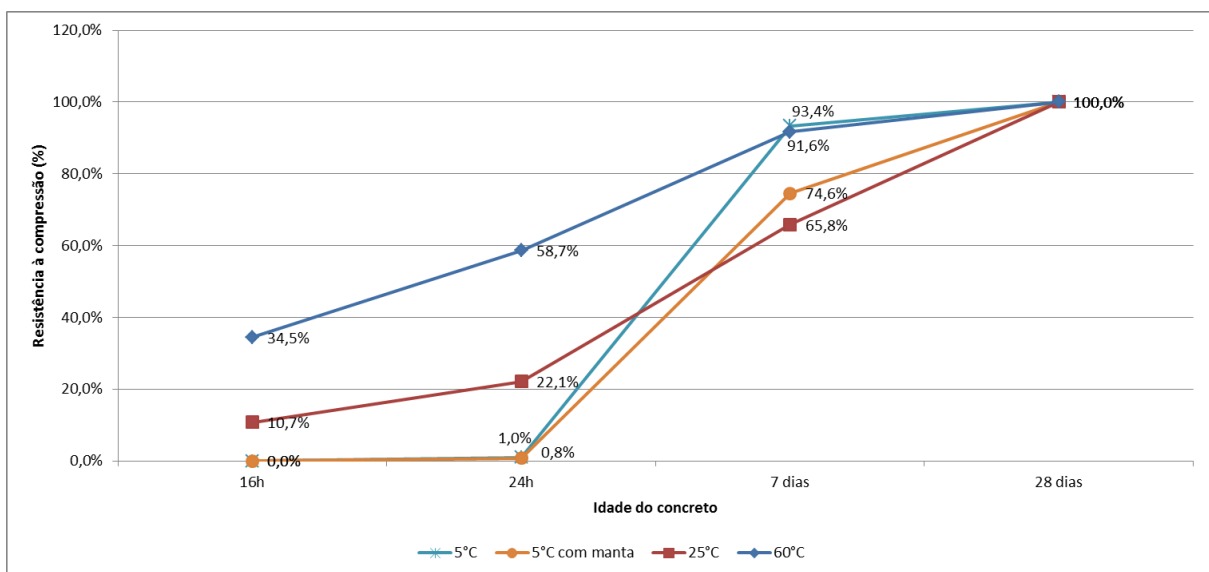
Pode-se notar que para a idade de 16h as temperaturas mais baixas não tiveram crescimento de resistência. Para a temperatura de cura de 25°C obteve-se 10,7% da resistência final e para temperatura de 60°C aproximadamente 34,5%.

Analisando-se a idade de 24h pode-se notar que as temperaturas baixas continuam com crescimento praticamente nulo. Os corpos de prova curados a temperatura de 25°C mantiveram uma taxa de crescimento, de 16h para 24h, similar as primeiras 16h. Já para a temperatura de 60°C observou-se uma taxa de crescimento cerca de 10% menor que nas primeiras 16h de cura.

No intervalo de 24h para 7 dias observa-se a maior taxa de crescimento da resistência à compressão para as temperaturas baixas, porém para a temperatura de 60°C observa-se praticamente a mesma taxa de crescimento das primeiras 16h com aproximadamente 30%.

No intervalo de 7 para 28 dias nota-se que a maior taxa de crescimento acontece para a temperatura de 25°C. A temperatura de 60°C, durante 21 dias, ganhou apenas 8,4% de resistência, o que pode ser explicado pela rápida hidratação do cimento formando grandes cristais e assim aumentado a porosidade do concreto.

Figura 32 – Percentagem da resistência à compressão ao longo do tempo considerando 100% a resistência de cada temperatura aos 28 dias



(fonte: elaborado pelo autor)

Conforme informado pela construtora na prática, o trabalho constatou que em baixas temperaturas esse traço de concreto não atinge resistência satisfatória nas primeiras idades e a manta térmica não foi o suficiente para atingir a resistência esperada.

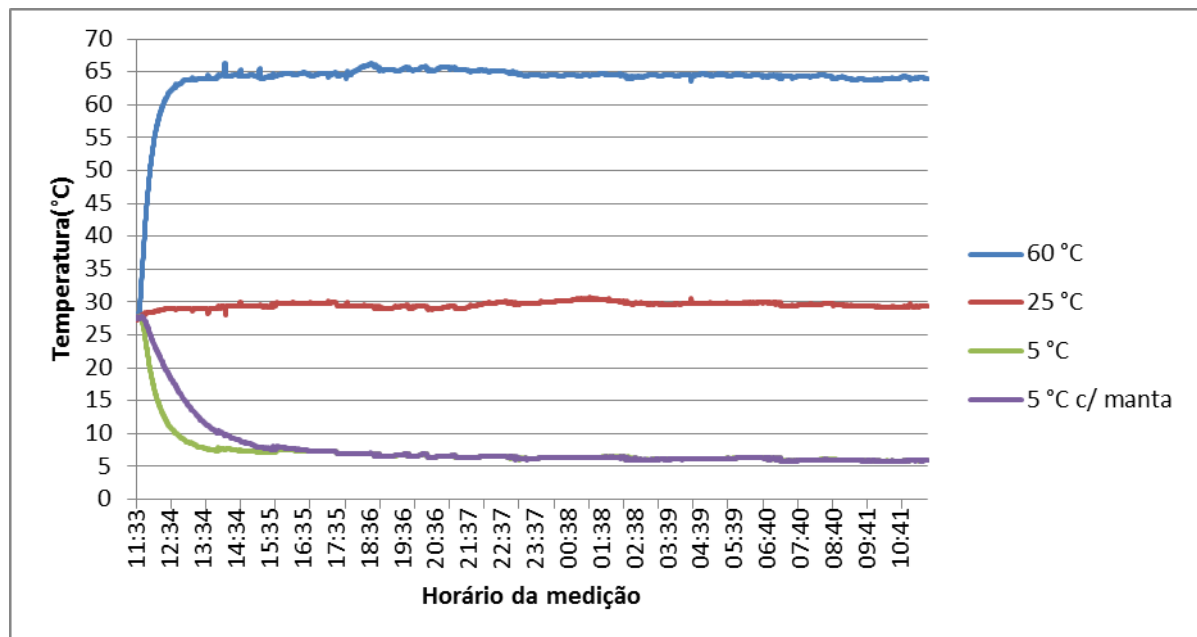
## 5.2 TEMPERATURA INTERNA DO CONCRETO

As medições da temperatura interna do concreto são apresentadas a seguir. Por ter sido gerada uma tabela muito extensa com aproximadamente quatro mil leituras, os dados são apresentados apenas por gráficos.

Os dados das primeiras 24 horas de leituras são apresentados na figura 33. Pode-se observar que as temperaturas seguem a tendência de se estabilizarem próximas às temperaturas em que o concreto está sendo submetido à cura. Verifica-se que para 25°C a temperatura estabiliza-se muito rápido, se mantendo em torno de 29°C. Na temperatura de 60°C, há um crescimento rápido, estabilizando após cerca de 1 hora, com alguns picos posteriores chegando a 65°C.

As temperaturas mais baixas sofrem um comportamento similar, tendendo a estabilizar em torno dos 6°C.

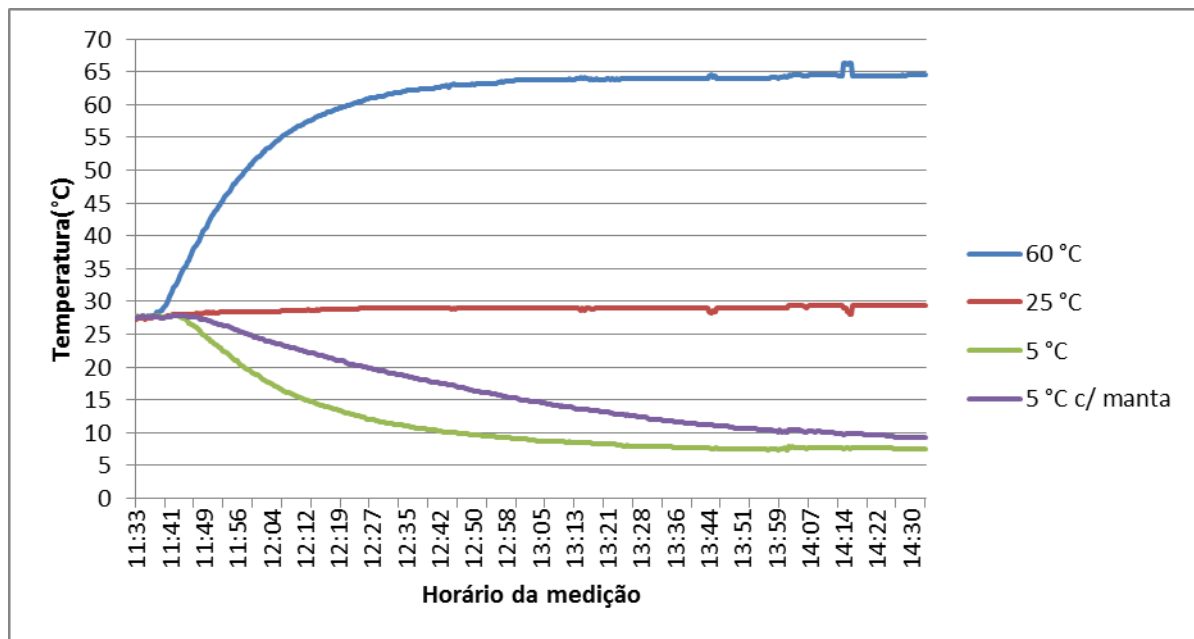
Figura 33 – Temperatura interna do concreto nas primeiras 24 horas



(fonte: elaborado pelo autor)

Pode-se melhor visualizar, nas três primeiras horas (figura 34), a diminuição mais lenta da temperatura do corpo de prova com manta térmica em comparação ao corpo de prova sem manta. Por exemplo, 2 horas após o início do ensaio, o corpo de prova sem a manta encontrava-se próximo à 6°C e com manta cerca de 12°C. Apenas 5 horas após o início do ensaio as temperaturas se estabilizaram, sendo que os corpos de prova envoltos pela manta térmica demoraram cerca de duas horas a mais para se estabilizarem. Mesmo os corpos de prova envolvidos pela manta térmica mantendo o calor por mais tempo, obteve-se apenas um pequeno acréscimo na resistência à compressão aos 28 dias.

Figura 34 – Temperatura interna do concreto nas primeiras 3 horas



(fonte: elaborado pelo autor)

### 5.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A seguir são apresentados os dados obtidos após uma análise estatística. Os dados foram explorados com auxílio do software Statistica 7.0, através da Análise de Variância (ANOVA), onde avaliou-se as variáveis deste trabalho, individualmente ou combinadas, verificando se possuíam ou não efeitos significativos sobre os resultados, com um intervalo de confiança de 95%.

A tabela 9 exibe o resultado da Análise de Variância, na qual apresenta que as interações entre temperatura, tempo de cura e temperatura\*tempo de cura foram significativas.

Tabela 9 – ANOVA: Influência da temperatura e tempo de cura na resistência à compressão

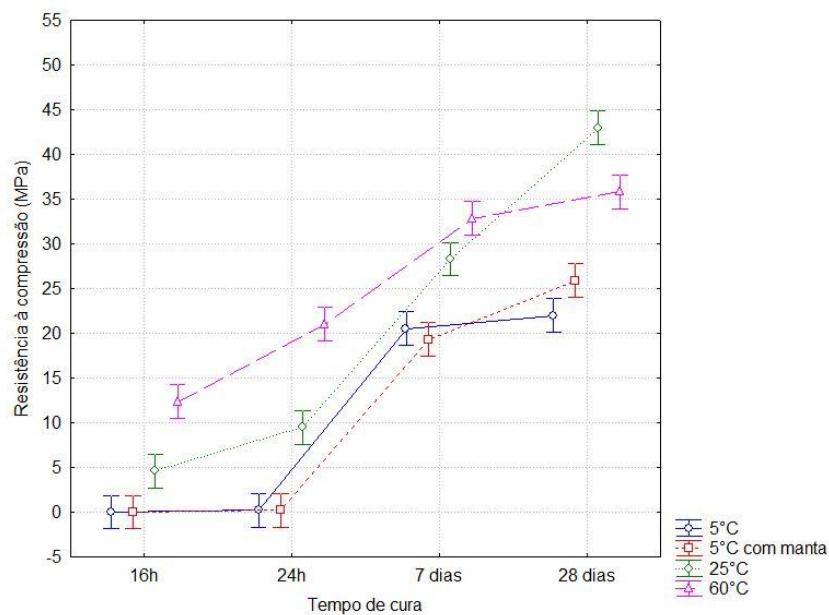
Effect	SS	Degr. Of Freedom	MS	F	p
Intercept	14247,27	1	14247,27	5549,716	0,000000
Temperatura	1958,26	3	652,75	254,266	0,000000
Tempo de cura	6383,60	3	2127,87	828,864	0,000000
Temperatura*Tempo de cura	419,26	9	46,58	18,146	0,000000
Error	82,15	32	2,57		

(fonte: elaborado pelo autor)

Na figura 35, comparando-se a variável 5°C e 5°C com manta, pode-se notar que o resultado de resistência à compressão apresentou diferença significativa apenas aos 28 dias. Nos restantes dos intervalos de tempo não existe diferença significativa entre as duas variáveis.

Analisando apenas a temperatura de 5°C pode-se notar que não existe diferença significativa do intervalo de 7 para 28 dias. Já para a variável 5°C com manta verifica-se diferença significativa da resistência à compressão para o mesmo intervalo.

Figura 35 – Análise estatística da influência da temperatura de cura do concreto sobre a resistência à compressão ao longo do tempo



(fonte: elaborado pelo autor)



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As conclusões apresentadas se restringem a metodologia e materiais adotados no presente trabalho. Alterações dos procedimentos ou materiais podem provocar variações dos resultados.

Todas as temperaturas internas dos corpos de prova tenderam a se estabilizar próximo às temperaturas de cura em que estavam submetidos.

O concreto curado em temperaturas baixas apresentou resistência à compressão pouco satisfatória, tanto para primeiras idades, quanto para 28 dias. A manta térmica utilizada pela construtora em baixas temperaturas, não apresentou resultado significativo para as primeiras idades, porém aos 28 dias houve um acréscimo de resistência à compressão significativo em relação aos corpos de provas sem a manta térmica. Com a medição da temperatura interna viu-se que os corpos de prova envoltos pela manta térmica levaram cerca de duas horas a mais para estabilizar, isso pode ter ocasionado o acréscimo de resistência aos 28 dias.

A temperatura de cura de 25°C teve um crescimento gradual de resistência à compressão, ultrapassando os 40 MPa aos 28 dias. Para a temperatura de 60°C, a qual se viu um grande crescimento nas primeiras idades, nota-se que aos 28 dias houve um crescimento menor, não alcançando os 40 MPa esperados.

Apesar da temperatura de 5°C ter alcançado apenas 50% da resistência esperada, aproximadamente, o concreto continuará desenvolvendo sua resistência e possivelmente chegará mais próximo do esperado em idades avançadas.

Para as peças pré-moldadas confeccionadas na obra é esperado que o calor de hidratação gerado pelas reações seja mais elevado, pois as peças tem um volume de concreto muito superior aos corpos de prova utilizados para desenvolvimento desse estudo. Com isso, as resistências obtidas no trabalho podem divergir de peças com maiores volumes.

Fica como sugestões para futuros trabalhos a utilização de outro tipo de cimento, outras temperaturas de cura e outros materiais que busquem manter o calor de hidratação.

## REFERÊNCIAS

. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768**: Aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 67**: concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 23**: cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001a.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 14931**: execução de estruturas de concreto – procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52**: agregado miúdo – determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 53**: agregado graúdo – determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

BARDELLA, P. S. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com os cimentos Portland de alta resistência inicial e de alto-forno aditivados com sílica ativa curados termicamente**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, 2005.

BARDELLA, P. S.; BARBOSA, D. C.; CAMARINI, G. **Sistemas de Cura em Concretos Produzidos com Cimento Portland de Alto-Forno com Utilização de Sílica Ativa**. In: 1º ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA-PROJETO-PRODUÇÃO EM CONCRETO PRÉ-MOLDADO. São Carlos, 2005.

BARDELLA, P. S.; BARBOSA, D. C.; CAMARINI, G. **Influência da cura térmica na estrutura porosa do concreto com sílica ativa**. In: SIMPÓSIO EPUSP SOBRE ESTRUTURAS DE CONCRETO, 6., 2006, São Paulo. Anais... São Paulo: EPUSP, 2006. p. 1413-1424. Disponível em: <<http://engipapers.com.br/artigos/00302COAD2006.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2013.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**, 3. ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos, 1987.

BEZERRA, S. A. **Influência do tipo e do tempo de duração de cura nas propriedades mecânicas de concretos de alto desempenho (CAD) produzidos em período quente ( $t > 25$ ) e de baixa umidade relativa do ar ( $h < 50\%$ )**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2005.

CAMARINI, G. & CINCOTTO, M.A. .Cura térmica: características do início de hidratação dos cimentos com escória. In: 4 ° **Congresso Brasileiro de Cimento**, v. 1, p. 21-36, São Paulo, 1995.

COLIANTE, J. G. R. **Cura térmica em argamassas de concreto de alto desempenho: caracterização da microestrutura e da resistência à compressão**. 2013. 93 f. Trabalho de conclusão de curso – Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

DOS ANJOS, R. D., ISMAEL, M. R., RAMAL, F. T., PANDOLFELLI, V. C. **Adição de microssilica e a secagem de concretos refratários**. Cerâmica 50 (2004) 331-335, Departamento de Engenharia de Materiais – DEMa, Universidade Federal de S. Carlos – UFSCar, 2004.

FERREIRA JÚNIOR, E. L. **Avaliação de propriedades de concretos de cimento Portland de alto-forno e cimento Portland de alta resistência inicial submetidos a diferentes condições de cura**. 2003. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2003.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2010. v. 2. p. 905-944.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1993 (reimpressão 2001).

MARTINS, A. R. **Efeito da cura térmica e de cimentos com escória granulada de alto-forno na durabilidade do concreto de cobertura**. 2001. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2001.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1. ed. (4. tiragem) São Paulo: Pini, 1994 (tiragem 2001).

MELO, A. B. **Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland**. Escola de Engenharia de São Carlos - ECSC/USP. São Carlos, 2000. 271 p.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**, 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

PEREIRA, V. G. A. **Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: Influência do tipo de cimento, da relação A/C, da temperatura e do tempo de cura**. 2001. 138 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

PETRUCCI, G. R. P. **Concreto de cimento Portland**. 13 ed. São Paulo: Globo, 1998

SALUM, P. L. **Efeito da elevação de temperatura sobre a resistência à compressão de concretos massa com diferentes teores de cinza volante.** 2016. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SILVA, M. G. da. **A influência da temperatura na hidratação dos cimentos de escória de alto forno.** São Paulo: EPUSP, 1998. 20p (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/224). Disponível em: <[http://www.pcc.poli.usp.br/files/text/publications/BT\\_00224.pdf](http://www.pcc.poli.usp.br/files/text/publications/BT_00224.pdf)>. Acesso em: 14 jun. 2016.

SILVA, M. G. da. Cimento Portland com Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2007. v. 1. p. 761-793.

**APÊNDICE A– Dimensões dos corpos de prova e cálculo do fator de correção (h/d)**

			D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Média (mm)	h1 (mm)	h2 (mm)	h3 (mm)	Média (mm)	h/d	Fator de Correção
5°C	16h	CP1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		CP2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		CP3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	24h	CP1	95,03	94,63	94,32	<b>94,66</b>	186,11	185,92	185,70	<b>185,91</b>	1,96	0,997118
		CP2	94,80	93,80	94,10	<b>94,23</b>	182,22	183,35	182,31	<b>182,63</b>	1,94	0,995042
		CP3	95,80	94,60	94,65	<b>95,02</b>	185,20	185,51	185,14	<b>185,28</b>	1,95	0,996001
	7 dias	CP1	94,80	94,85	95,15	<b>94,93</b>	184,25	183,73	182,53	<b>183,50</b>	1,93	0,994638
		CP2	94,97	95,14	94,70	<b>94,94</b>	180,25	180,12	180,20	<b>180,19</b>	1,90	0,991840
		CP3	94,96	95,04	94,75	<b>94,92</b>	184,62	184,66	184,40	<b>184,56</b>	1,94	0,995555
	28 dias	CP1	94	94,15	94,85	<b>94,33</b>	186,54	186,38	186,36	<b>186,43</b>	1,98	0,998100
		CP2	94,66	94,73	94,5	<b>94,63</b>	186,3	186,25	186,2	<b>186,25</b>	1,97	0,997455
		CP3	95,04	95	94,78	<b>94,94</b>	181,6	181,4	181,72	<b>181,57</b>	1,91	0,993000
5°C com manta	16h	CP1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		CP2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		CP3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	24h	CP1	95,53	95,31	95,41	<b>95,42</b>	183,98	184,41	184,01	<b>184,13</b>	1,93	0,994383
		CP2	94,84	95,59	93,87	<b>94,77</b>	184,36	184,87	184,89	<b>184,71</b>	1,95	0,995925
		CP3	95,09	95,26	94,85	<b>95,07</b>	182,46	182,95	182,93	<b>182,78</b>	1,92	0,993812
	7 dias	CP1	95,05	95,25	95,25	<b>95,18</b>	181,96	182,06	181,6	<b>181,87</b>	1,91	0,992861
		CP2	94,26	94,53	94,65	<b>94,48</b>	183,57	183,33	183,25	<b>183,38</b>	1,94	0,995278
		CP3	95,13	95,2	95,18	<b>95,17</b>	182,68	183	182,87	<b>182,85</b>	1,92	0,993704
	28 dias	CP1	95,16	94,9	94,84	<b>94,97</b>	182,07	182	182,3	<b>182,12</b>	1,92	0,993421
		CP2	95,03	95	94,65	<b>94,89</b>	180,38	180,67	180,37	<b>180,47</b>	1,90	0,992148
		CP3	94,93	94,9	94,75	<b>94,86</b>	184,55	184,6	184,5	<b>184,55</b>	1,95	0,995640
25°C	16h	CP1	94,95	94,85	95,10	<b>94,97</b>	181,84	181,81	181,72	<b>181,79</b>	1,91	0,993140
		CP2	95,15	95,18	95,20	<b>95,18</b>	184,80	184,75	184,45	<b>184,67</b>	1,94	0,995220
		CP3	95,07	95,09	94,95	<b>95,04</b>	182,32	182,32	182,30	<b>182,31</b>	1,92	0,993468
	24h	CP1	95,30	95,19	95,64	<b>95,38</b>	186,48	186,17	186,25	<b>186,30</b>	1,95	0,996265
		CP2	95,25	95,13	95,33	<b>95,24</b>	185,31	185,11	185,25	<b>185,22</b>	1,94	0,995590
		CP3	94,69	94,49	95,05	<b>94,74</b>	186,95	186,54	186,78	<b>186,76</b>	1,97	0,997695
	7 dias	CP1	94,70	94,88	95,06	<b>94,88</b>	183,31	183,23	183,18	<b>183,24</b>	1,93	0,994503
		CP2	95,00	94,68	94,65	<b>94,78</b>	182,85	182,51	182,58	<b>182,65</b>	1,93	0,994170
		CP3	94,94	94,81	95,05	<b>94,93</b>	180,44	180,46	180,60	<b>180,50</b>	1,90	0,992107
	28 dias	CP1	95,1	95	94,84	<b>94,98</b>	186,2	186,1	186	<b>186,10</b>	1,96	0,996749
		CP2	94,52	94,42	94,64	<b>94,53</b>	184,23	184,3	184,36	<b>184,30</b>	1,95	0,995974
		CP3	95,1	95,2	95,25	<b>95,18</b>	179,85	180,15	180	<b>180,00</b>	1,89	0,991287
60°C	16h	CP1	93,9	93,98	94,2	<b>94,03</b>	185,05	184,84	185,3	<b>185,06</b>	1,97	0,997456
		CP2	95,2	95	94,85	<b>95,02</b>	184,8	185,63	185,2	<b>185,21</b>	1,95	0,995939
		CP3	94,86	94,76	94,3	<b>94,64</b>	188,4	188,65	188,7	<b>188,58</b>	1,99	0,999411
	24h	CP1	93,89	94,54	94,96	<b>94,46</b>	185,91	185,82	186	<b>185,91</b>	1,97	0,997445
		CP2	96,06	95,19	94,52	<b>95,26</b>	182,36	183,28	182,79	<b>182,81</b>	1,92	0,993530
		CP3	95,41	94,08	94,46	<b>94,65</b>	185,62	186,04	184,79	<b>185,48</b>	1,96	0,996774
	7 dias	CP1	95,07	94,8	95,13	<b>95,00</b>	184,57	184,4	184,46	<b>184,48</b>	1,94	0,995349
		CP2	94,51	94,91	94,88	<b>94,77</b>	182,89	183,22	182,9	<b>183,00</b>	1,93	0,994488
		CP3	94,43	94,62	95,07	<b>94,71</b>	182,08	181,82	182,17	<b>182,02</b>	1,92	0,993758
	28 dias	CP1	95,24	94,9	95,22	<b>95,12</b>	184,12	184,26	184,2	<b>184,19</b>	1,94	0,994914
		CP2	94,52	94,92	94,98	<b>94,81</b>	182,37	182,33	182,3	<b>182,33</b>	1,92	0,993857
		CP3	95,32	94,9	95,12	<b>95,11</b>	180,18	180,14	180,23	<b>180,18</b>	1,89	0,991553